

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Alen Stepić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Alen Stepić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovom prilikom zahvaljujem prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu na stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Također zahvaljujem svojoj obitelji za pruženu potporu tijekom dosadašnjeg studija te svojoj djevojci koja mi je pomogla oko pravopisa i gramatike.

Alen Stepić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. BUŠENJE	2
2.1. Svrđlo.....	4
2.1.1. Podjela svrdla.....	5
2.2. Značajke postupka bušenja	6
2.2.1. Mala krutost sustava	6
2.2.2. Otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a	8
2.2.3. Promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice	10
2.2.4. Promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice.....	12
2.3. Materijali svrdla	13
2.3.1. Alatni čelici	16
2.3.2. Brzorezni čelik	17
2.3.3. Rezna keramika.....	19
2.3.4. Tvrdi metal.....	20
2.3.5. Cermet.....	21
2.3.6. Kubični bor nitrid.....	22
2.3.7. Polikristalni dijamant	22
3. TROŠENJE.....	24
3.1. Trošenje reznih alata	24
3.1.1. Abrazija.....	25
3.1.2. Adhezija	28
3.1.3. Umor površine	30
3.1.4. Oksidacija	33
3.1.5. Difuzija	35
3.2. Oblici trošenja reznih oštrica	38
3.3. Trajanje oštrice reznog alata	44
4. EKSPERIMENTALNI DIO	48
4.1. Određivanje materijala alata	49
4.1.1. Kemijska analiza uzorka osnovnog materijala svrdla.....	53
4.1.2. Kemijska analiza pločice svrdla.....	57
4.1.3. Mjerenje tvrdoće svrdla	60
4.2. Određivanje tragova trošenja	62
4.2.1. Određivanje tragova trošenja na poprečnoj oštrici i vrhu svrdla	63

4.2.2.	Određivanje tragova trošenja na bočnom dijelu svrdla.....	65
4.2.3.	Određivanje tragova trošenja na dijelu utora kod glavne oštrice svrdla	66
4.2.4.	Određivanje tragova trošenja na rubu utora.....	68
4.2.5.	Određivanje tragova trošenja na utoru svrdla	69
5.	ZAKLJUČAK.....	71
	LITERATURA.....	72
	PRILOZI.....	74

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Stolna bušilica	2
Slika 2.2.	Radijalna bušilica	2
Slika 2.3.	Ručna bušilica za bušenje betona	3
Slika 2.4.	Bušenje betona ručnom bušilicom	3
Slika 2.5.	Spiralno svrdlo s koničnom drškom	4
Slika 2.6.	Spiralno svrdlo	5
Slika 2.7.	Razne vrste svrdla	6
Slika 2.8.	Duboko bušenje betona ručnom bušilicom	7
Slika 2.9.	Dimenzije spiralnog svrdla	7
Slika 2.10.	Odvojena čestica u obliku prašine	8
Slika 2.11.	Odvojena čestica u obliku prašine	9
Slika 2.12.	Podmazivanje pile za asfalt	9
Slika 2.13.	Promjena glavne brzine rezanja i kuta rezanja od sredine prema obodu svrdla....	11
Slika 2.14.	Oblik odvojene čestice kod tokarenja	12
Slika 2.15.	Oblik kontinuirane (neisprekidane) odvojene čestice kod bušenja	12
Slika 2.16.	Prikaz reznih oštrica i kutova	13
Slika 2.17.	Dijagram popuštanja za različite alatne čelike	15
Slika 2.18.	Područja žilavosti i tvrdoće osnovnih vrsta reznih materijala	16
Slika 2.19.	Ovisnost tvrdoće o temperaturi rada alatnog čelika C 45 W (Č1531)	17
Slika 2.20.	Ovisnost tvrdoće o temperaturi rada alatnog čelika 1.3355 (Č6880)	18
Slika 2.21.	Rezne pločice od keramike: bijele – Al_2O_3 , crne Si_3N_4	20
Slika 2.22.	Rezne pločice od tvrdog metala	21
Slika 3.1.	Ovisnost raznih mehanizama trošenja o temperaturi	25
Slika 3.2.	Jedinični događaj abrazije	26
Slika 3.3.	Abrazija: a) u dodiru dvaju tijela, b) i triju tijela	26
Slika 3.4.	Selektivna abrazija	27
Slika 3.5.	Nulta abrazija	28
Slika 3.6.	Površina potrošena djelovanjem nulte abrazije	28
Slika 3.7.	Jedinični događaj adhezije	29
Slika 3.8.	Površina s koje su adhezijom iščupane čestice	29
Slika 3.9.	Rabinowitzova karta tribološke kompatibilnosti, izvedena iz binarnih dijagrama stanja	30
Slika 3.10.	Jedinični događaj umora površine	31
Slika 3.11.	Raspodjela smičnih naprezanja za slučaj dodira ravnina / valjak i normalnog opterećenja	31
Slika 3.12.	Izgled površine oštećene umorom	32
Slika 3.13.	Oksidacija površine metala	34
Slika 3.14.	Ovisnost debljine sloja oksida y o vremenu t	35
Slika 3.15.	Shematski prikaz intersticijskog mehanizma	36
Slika 3.16.	Shematski prikaz supstitucijskog mehanizma	37
Slika 3.17.	Raspodjela temperature u zoni rezanja	39
Slika 3.18.	Trošenje stražnje površine	40
Slika 3.19.	Toplinska napuknuća	40
Slika 3.20.	Zarezno trošenje	41
Slika 3.21.	Kut prednamještanja alata κ : a) $\kappa = 95^\circ$, b) $\kappa = 95^\circ$ [1]	41

Slika 3.22. Kratersko trošenje.....	42
Slika 3.23. Krzanje oštrice.....	42
Slika 3.24. Naljepak na reznjoj oštrici.....	43
Slika 3.25. Lom oštrice reznog alata	43
Slika 3.26. Plastična deformacija rezne oštrice	44
Slika 3.27. Prikaz istrošenja slobodne površine svrdla za različite posmake u zavisnosti o vremenu	45
Slika 4.1. Svrdlo na kojem su se vršila ispitavanja	48
Slika 4.2. Dijelovi svrdla koji su korišteni za ispitivanje	49
Slika 4.3. Ravnina brušenja i poliranja dijela 1 okomita na strelicu	50
Slika 4.4. Brušena i polirana površina dijela 1 zalivenog u plastičnoj masi	50
Slika 4.5. Polirana površina dijela 1	51
Slika 4.6. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51	52
Slika 4.7. Uređaj za brušenje uzoraka BUEHLER - PHOENIX ALPHA.....	52
Slika 4.8. Uređaj za poliranje uzoraka Struers DAP-V	53
Slika 4.9. Pukotine na dijelu 4 nastale tijekom procesa tlačenja.....	54
Slika 4.10. Skenirajući elektronski mikroskop s energijskom disperzivnom spektroskopijom (SEM/EDS)	54
Slika 4.11. Rezultati SEM-EDS analize materijala svrdla	56
Slika 4.12. Nagrižena površina osnovnog metala svrdla (svjetlosni mikroskop).....	57
Slika 4.13. Rezultati SEM-EDS analize materijala pločice (veća površina).....	58
Slika 4.14. Rezultati SEM-EDS analize materijala pločice (zrno karbida).....	58
Slika 4.15. Nagrižena površina pločice od tvrdog metala (svjetlosni mikroskop).....	59
Slika 4.16. Mikrostruktura pločice od tvrdog metala (SEM)	59
Slika 4.17. Tvrdomjer za mjerenje tvrdoće po Vickersu	60
Slika 4.18. Otisak mjerenja tvrdoće na osnovnom materijalu	61
Slika 4.19. Otisak mjerenja tvrdoće na lemu.....	62
Slika 4.20. Područje svrdla na kojem se analiziralo stanje površine vrha alata i poprečne oštrice te stražnje površine	63
Slika 4.21. Stanje vrha svrdla i poprečne oštrice te stražnje površine.....	63
Slika 4.22. Tragovi trošenja na bočnom dijelu svrdla	65
Slika 4.23. Stanje vrha svrdla i poprečne oštrice te stražnje površine.....	65
Slika 4.24. Područje svrdla na kojem su se analizirali tragovi trošenja utora svrdla kod glavne oštrice	66
Slika 4.25. Stanje utora svrdla	67
Slika 4.26. Područje svrdla na kojem su se analizirali tragovi trošenja ruba utora	68
Slika 4.27. Tragovi trošenja ruba utora svrdla.....	68
Slika 4.28. Područje svrdla na kojem su se analizirali tragovi trošenja utora svrdla	69
Slika 4.29. Tragovi trošenja ruba utora svrdla.....	70

POPIS TABLICA

Tablica 2.1.	Ekonomična brzina rezanja i sastav ugljičnog i brzoreznog čelika	18
Tablica 3.1.	Dozvoljeno istrošenje svrdla od brzoreznog čelika	45
Tablica 3.2.	Dozvoljeno istrošenje svrdla s pločicama od tvrdog metala	45
Tablica 4.1.	Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala svrdla.....	61
Tablica 4.2.	Rezultati mjerenja tvrdoće na materijalu lema	61
Tablica 4.3.	Rezultati mjerenja tvrdoće tvrdog metala	62

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
-------------	---------------------

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
2φ	rad	kut vrha svrdla
a_H	m^2	površina Hertzova dodira
C_L	-	promjer svrdla
D	m^2/s	difuzivnost ili difuzijski koeficijent
D_0	m^2/s	difuziska konstanta materijala
d	m	promjer svrdla
d_{HV}	m	srednja udaljenost između suprotnih vrhova otiska kod Vickers metode
d_0	m	promjer jezgre svrdla
d_1	m	udaljenosti između prvih suprotnih dijagonala otiska kod mjerenja tvrdoće Vickers metodom
d_2	m	udaljenosti između drugih suprotnih dijagonala otiska kod mjerenja tvrdoće Vickers metodom
F	N	sila (težina) opterećenja kod mjerenja tvrdoće Vickers metodom
F_c	N	glavna sila rezanja
F_f	N	posmična sila rezanja
F_N	N	normalne komponente opterećenja
F_p	N	natražna sila rezanja
F_t	N	tangencijalna komponente opterećenja
H	-	tvrdoća
HV	-	tvrdoća u Vickersima
I	A	jakos električne struje
J	kg/m^2s	intezitet difuzije
L	m	ukupni put bušenja
l	m	dubina bušenja
l_1	m	radna dužina svrdla
l_a	m	dubina bušenja
n	-	Taylorov eksponent
n_v	okr/s	frekvencija vrtnje
Q_d	J/mol	aktivacijska energija
R	J/(mol K)	opća plinska konstanta
r	m	radijus svrdla
s	m/okr	posmak
t	s	vrijeme
T	K	termodinamička (apsolutna) temperatura
v_c	m/s	glavna brzina rezanja
v_f	m/s	posmična brzina rezanja
$v_{L\ 2000}$	m/s	brzina pri kojoj svrdlo može izbušiti 2 000 mm duboku rupu
y	m	debljina sloja oksida

α	rad	slobodni kut na vrhu
α_0	rad	stražnji kut na vrhu oštrice
α_r	rad	slobodni kut u procesu rezanja ili kut rada
β	rad	kut klina
β_0	rad	kut klina na vrhu oštrice
γ	rad	kut uspona spirale
γ_0	rad	prednji kut na vrhu oštrice
γ_r	rad	prednji kut u procesu rezanja ili kut rada
ε	rad	kut posmaka
τ_N	N/mm ²	tangencijalna komponente naprezanja
ω	rad/s	kutna brzina

SAŽETAK

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava za izradu provrta manjih promjera ili proširivanje provrta većih promjera.

Alat za bušenje je svrdlo koje se sastoji od radne dužine, usmjeravajućeg (kalibrirajućeg) dijela i drška te ima definiranu geometriju reznog dijela. Geometrija svrdla i kinematika bušenja daju dosta nepogodne karakteristike rezanja koje često predstavljaju velike probleme i ograničavaju režime rezanja. Glavni zahtjevi za materijal reznih alata općenito pa tako i svrdla, su otpornost na trošenje i žilavost i te dvije značajke su kontradiktorne. Materijal svrdla se treba odabrati tako da bude prilagođen uvjetima rada zbog velikih razlika u cijeni, odnosno potrebno je uzeti u obzir da se ne odabere materijal koji je znatno skuplji, a njegove se prednosti ne mogu iskoristiti.

Trošenje je proces koji je kod reznih alata neizbježan. Postoji više mehanizama trošenja koji su prisutni tijekom operacije rezanja. Dije se na mehaničke (abrazija, adhezija i umor površine) i na kemijske (difuzija i oksidacija). Pri nižim temperaturama se javljaju samo mehanički mehanizmi trošenja dok su kod viših temperatura kemijski mehanizmi najznačajniji.

U prvom dijelu eksperimentalnog dijela se odredio osnovni materijal svrdla, rezne pločice i lema koji se nalazi između rezne pločice i osnovnog materijala. U drugom dijelu eksperimentalnog dijela su se analizirali procesi i mehanizmi na tragovima trošenja na svim karakterističnim dijelovima svrdla.

Ključne riječi: svrdlo, trošenje, beton, trajnost, otpornost na trošenja, materijal

SUMMARY

Drilling is a machining (cutting) process that is used for making holes with a small diameter or stretching the ones with a large diameter.

The tool used for drilling is a bore. It consists of a working part, a directing part and it has a defined geometry of the cutting edge. The bore geometry and the drilling kinematics provide pretty inconvenient cutting characteristics that often cause problems and limit cutting regime. Main demands of a bore and the cutting tools material in general are wear resistance and toughness and the two characteristics are contradictory. The bore material must be chosen to be adjusted to working conditions because of the significant price differences. In other words, a material that is more expensive and its advantages can not be used is recommended not to be applied. In cutting operations, wearing is an inevitable process. There are a few wearing mechanisms present during the cutting operation: mechanicals (abrasion, adhesion and surface fatigue) and chemicals (diffusion and oxidation). Only mechanical wear mechanisms are present at lower temperatures while the chemicals are more significant ones at higher temperatures.

In first part of the experiment section basic material of the bore, the insert and the solder, that is situated between the insert and basic material, is defined. In the second section the wearing marks processes and mechanisms at all parts of a bore are analyzed.

Key words: bore, wear, concrete, durability, wearing resistance, material

1. UVOD

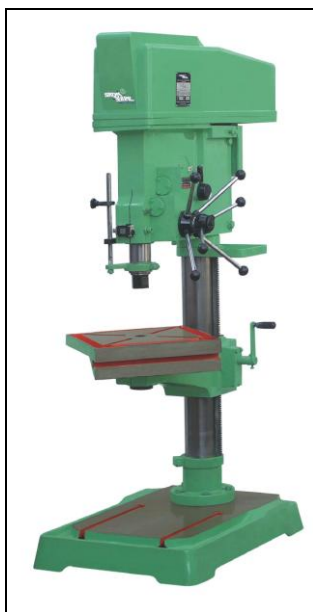
Bušenje je proces koji se koristi u skoro svim granama gospodarstva. Primjenjuje se od obrade u industriji do bušenja tunela ili čak naftnih bušotina. Dok se kod bušenja tunela ne koriste svrdla, u drugim granama to nije slučaj. To je od velike važnosti zbog nepogodnosti koje se javljaju kod primjene tog alata. Nepogodnosti se pojavljuju kako i kod samog procesa bušenja, tako i kod trošenja.

Bušiti se također mogu i različiti materijali kao što su čelici i drugi metali, beton, drvo, polimeri itd. Kod bušenja drveta se ne javljaju velike sile otpora, a ne razvijaju se niti velike temperature zbog opasnosti od zapaljenja drveta. Kod bušenja plastike je također slična situacija, iako polimeri nisu zapaljivi, ne smiju se previše zagrijati kako ne bi puštali otrovne plinove, a i sami po sebi su otporni na adhezijsko trošenje, što smanjuje silu trenja i nastale temperature te sile rezanja. Kod obrade metala i betona to nije tako. Obrada metala se uglavnom izvodi na alatnim strojevima gdje se mogu postići i puno veće brzine pa i temperature, a bušenje betona se izvodi ručno te se primjenjuju manje brzine, ali se također niti ne primjenjuje hlađenje i podmazivanje što povećava procese trošenja alata.

Kako bi se olakšala obrada i produljio vijek trajanja svrdla, primjenjuju se različiti materijali svrdla i umetnutih reznih pločica za različite materijale obratka. Bez obzira na to proces trošenja se ne može izbjeći, ali se može usporiti.

2. BUŠENJE

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava za izradu provrta manjih promjera ili proširivanje provrta većih promjera. Izvodi se na alatnim strojevima bušilicama, ali može i na tokarilicama ili glodalicama. Ako se bušenje izvodi na bušilicama, glavno gibanje izvodi alat i ono je rotacijsko, a pomoćno gibanje može izvoditi ili alat ili obradak, ovisno o vrsti bušilice i ono je translacijsko [1].



Slika 2.1. Stolna bušilica [2]



Slika 2.2. Radijalna bušilica [3]



Slika 2.3. Ručna bušilica za bušenje betona [4]



Slika 2.4. Bušenje betona ručnom bušilicom [5]

Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu. Svrdla se dijele na [1]:

- a) spiralna svrdla,
- b) svrdla za središnje uvrte i
- c) posebna svrdla za duboko bušenje.

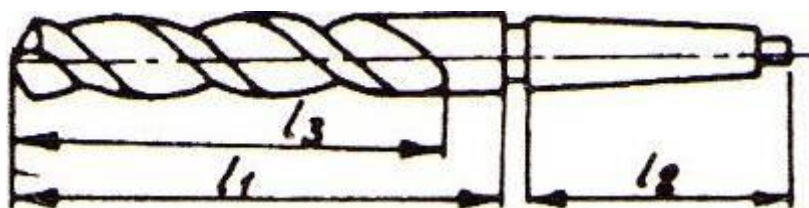
Podjela bušenja se može izvršiti na više načina. Može se gledati s aspekta materijala koji se buši, izvodi li se bušenje ručno ili strojno, buši li se prolazni ili neprolazni provrt itd. Sve to ovisi o konstrukciji alata, odabiru stroja za bušenje, materijalu alata, dobivenoj odvojenoj čestici (isprekidana, isjeckana ili kontinuirana), metodi hlađenja i podmazivanja.

Bušenje ima nekih sličnosti s tokarenjem, naročito kod upotrebe svrdla sa jednom oštricom (svrdla za bušenje topovskih cijevi). Kod spiralnih svrdla koja se danas najviše upotrebljavaju istovremeno su u zahvatu dvije glavne oštrice koje rade slično kao tokarski noževi, a pored njih na svrdlu se nalazi još jedna poprečna oštrica koja ima jako nepovoljne kuteve rezanja [6].

2.1. Svrdlo

Svrdla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima. Spiralno svrdlo se sastoji od (Slika 2.5) [6]:

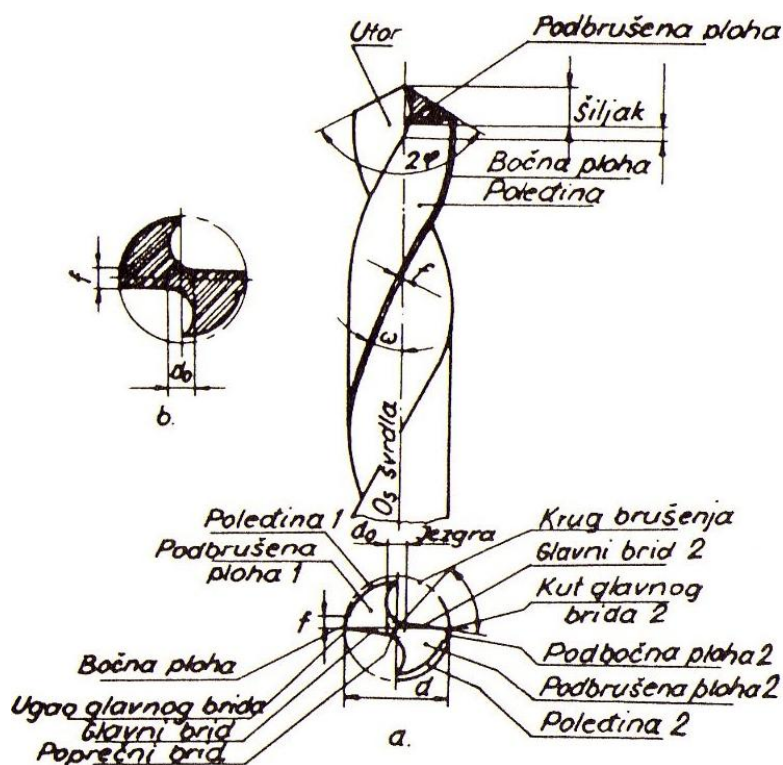
- radne dužine svrdla (l_3) koja sadrži spiralne utore, a uključuje u sebi rezni i kalibrirajući dio svrdla,
- reznog dijela koji je izbrušen u konus, tj. kut vrha svrdla (2φ) (Slika 2.13),
- usmjeravajućeg (kalibrirajućeg) dijela (l_1) – dio svrdla koji osigurava usmjeravanje svrdla u procesu rezanja i
- drška (l_2) – dio svrdla koji služi za pričvršćenje svrdla i prijenos okretnog momenta na svrdlo.



Slika 2.5. Spiralno svrdlo s koničnom drškom [6]

Osnovni elementi spiralnog svrdla su (Slika 2.6) [6]:

- a) prednja površina – zavojna površina utora po kojoj klizi odvojena čestica,
- b) stražnja površina (poledina) – površina okrenuta prema površini rezanja,
- c) glavna rezna oštrica – linija na kojoj se presjecaju prednja i stražnja površina alata; spiralno svrdlo ima dvije glavne rezne oštrice međusobno razmaknute za 180° ,
- d) rub – uski pojas na cilindričnoj površini svrdla raspoređen uzduž zavojnog utora koji služi za usmjeravanje svrdla pri bušenju i
- e) poprečna oštrica – linija koja se dobije kod presijecanja dviju stražnjih površina.



Slika 2.6. Spiralno svrdlo [6]

2.1.1. Podjela svrdla

Svrdla, kao i svih drugih alata ima različitih vrsta. Svrdla se mogu podijeliti na više načina: prema materijalu, obliku drške (cilindrična ili konična), dubini bušenja („obično” ili duboko bušenje), za koji materijal se primjenjuje [7] itd. Prema [6] svrdla se dijele na:

- spiralna svrdla,
- svrdla s pločicama od tvrdog metala,
- ravna svrdla,
- zabušivala,
- specijalne izvedbe spiralnih svrdala,
- noževe i motke za bušenje.



Slika 2.7. Razne vrste svrdla: a) svrdlo od brzoreznog čelika za krhke materijale koji daju lomljenu odvojenu česticu kao što je mjed i magnezijeve legure, b) svrdlo presvučeno slojem parnog oksida za visokokvalitetno bušenje s odličnim odvođenjem odvojene čestice, npr. za bušenje nehrđajućih čelika i bronce, c) svrdlo presvučeno slojem parnog oksida za duboko bušenje, d) svrdlo od brzoreznog čelika za središnji uvert [7]

2.2. Značajke postupka bušenja

Geometrija svrdla i kinematika bušenja daju dosta nepogodne karakteristike rezanja koje često predstavljaju velike probleme i ograničavaju režime rezanja. Bušenje karakterizira [1]:

- a) mala krutost sustava,
- b) otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a,
- c) promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice i
- d) promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice.

2.2.1. Mala krutost sustava

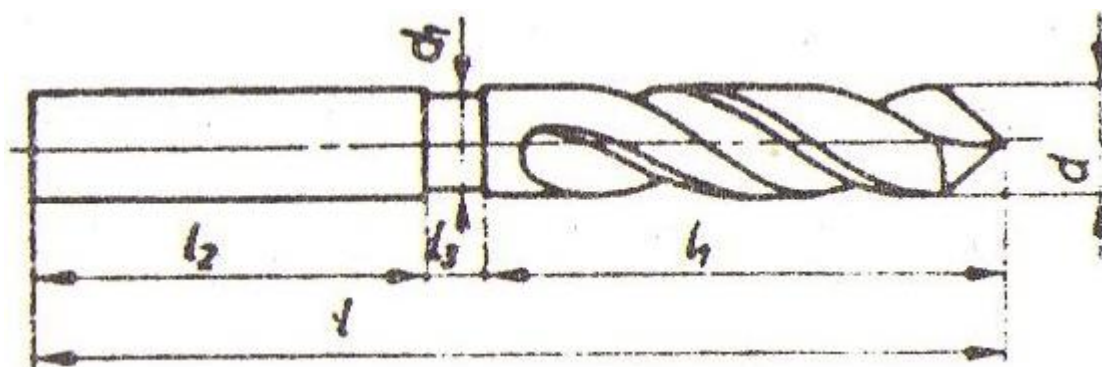
Mala krutost sustava uzrokovana je velikim omjerom između dužine svrdla i njegovog promjera. U većini slučajeva svrdla imaju veliki omjer između dužine i promjera. To se posebno izražava kod svrdla za duboko bušenje [1].

Duboko bušenje je ono kod kojeg je omjer između dubine rupe i njenog promjera veći od deset. Ovisno o zahtijevanoj preciznosti i materijalu koji se buši, taj omjer može biti i drugog iznosa [8].



Slika 2.8. Duboko bušenje betona ručnom bušilicom [9]

Već mala krutost svrdla je dodatno umanjena zbog žlijebova koji služe za odvođenje odvojene čestice nastale tijekom procesa rezanja [1].



Slika 2.9. Dimenzije spiralnog svrdla [10]

Dužina radnog dijela svrdla l_1 se računa prema izrazu [10]:

$$l_1 = l_a + 3d \quad (2.1)$$

gdje je:

l_1 – radna dužina svrdla [m]

l_a – dubina bušenja [m]

Promjer jezgre svrdla d_0 se računa prema izrazu [10]:

- za promjer svrdla 0,25...1,25 mm

$$d_0 = (0,2 \dots 0,28)d \quad (2.2)$$

- za promjer svrdla 1,5...12 mm

$$d_0 = (0,15 \dots 0,19)d \quad (2.3)$$

- za promjer svrdla iznad 13 mm

$$d_0 = (0,125 \dots 0,145)d \quad (2.4)$$

Kako je vidljivo iz izraza (2.2), (2.3) i (2.4) promjer jezgre svrdla je najmanje 3,5 puta manji od njegovog vanjskog promjera što ima za posljedicu malu krutost sustava.

2.2.2. Otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a

Otežano odvođenje odvojene čestice uzrokovano je time što je promjer rupe jednak promjeru svrdla pa se odvođenje odvojene čestice može obavljati samo kroz žlijebове svrdla. Operacija bušenja se često odvija tako da se rupe buše odozgo što također otežava odvođenje odvojene čestice zbog utjecaja gravitacije. Kod bušenja betona odvojena čestica je sitna i naročito isprekidana što omogućuje njezino olakšano odvođenje.

Kod bušenja dubokih provrta potrebno je povremeno izvlačiti svrdlo radi čišćenja njegovih utora [6].



Slika 2.10. Odvojena čestica u obliku prašine [11]



Slika 2.11. Odvojena čestica u obliku prašine [12]

Dovođenje SHIP-a (sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanja) je također otežano jer, kako je već navedeno, promjer rupe je jednak promjeru svrdla i nije moguće direktno dovođenje SHIP-a na mjesto bušenja. Kako je odvojena čestica kod bušenja betona u obliku prašine, ona snažno upija SHIP i onemogućuje da kroz nju SHIP prodire u dubinu rupe kao što bi mogao između odvojene čestice nekog metala. Postoje metode dovođenja SHIP-a direktno kroz samo svrdlo, ali kod ručnog bušenja je to teško izvedivo. Kako je za izgradnju raznih objekata dobro svojstvo betona što slabo vodi toplinu, tako je to i loše svojstvo za bušenje, odnosno općenito sve procese rezanja. U slučajevima gdje je to moguće kao npr. rezanje asfalta, obavezno se dodaje SHIP kako bi se olakšalo rezanje i produljilo trajanje reznog alata.



Slika 2.12. Podmazivanje pile za asfalt [13]

2.2.3. Promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice

Kao i kod svih konvencionalnih metoda obrade odvajanjem čestica gdje je glavno gibanje rotacijsko, i ovdje dolazi do pojave nejednolike brzine rezanja tijekom obrade. Dok je kod tokarenja (uzdužnog) dubina obrade uglavnom znatno manja od promjera obratka, što daje skoro jednaku brzinu obrade za svaki dio noža koji je u zahvatu, kod bušenja to nije slučaj. Budući da je glavna brzina jednaka:

$$v_c = \omega r \quad (2.5)$$

odnosno:

$$v_c = d\pi n_v \quad (2.6)$$

gdje je:

v_c – glavna brzina rezanja [m/s],

ω – kutna brzina rezanja [rad/s, s⁻¹],

r – radijus [m],

d – promjer svrdla [m] i

n_v – frekvencija vrtnje [okr./s, s⁻¹].

Sredina poprečne oštrice svrdla uvijek ima glavnu brzinu jednaku nuli. Budući da glavna brzina rezanja kod bušenja raste od nule do maksimuma (Slika 2.13), bitno je napomenuti da se računa sa srednjim promjerom, odnosno radijusom. Jednadžba za računanje glavne brzine rezanja kod bušenja [1]:

$$v_c = \frac{d}{2} \pi n_v \quad (2.7)$$

Iako se u praksi ne koristi radijus nego promjer, ovdje je u jednadžbi korišten radijus kako bi se pokazalo kako se obodna brzina svrdla mijenja od sredine prema obodu kako je vidljivo na slici Slika 2.13, gdje je:

v_c – glavna brzina rezanja,

F_c – glavna sila rezanja,

v_f – posmična brzina rezanja,

F_f – posmična sila rezanja,

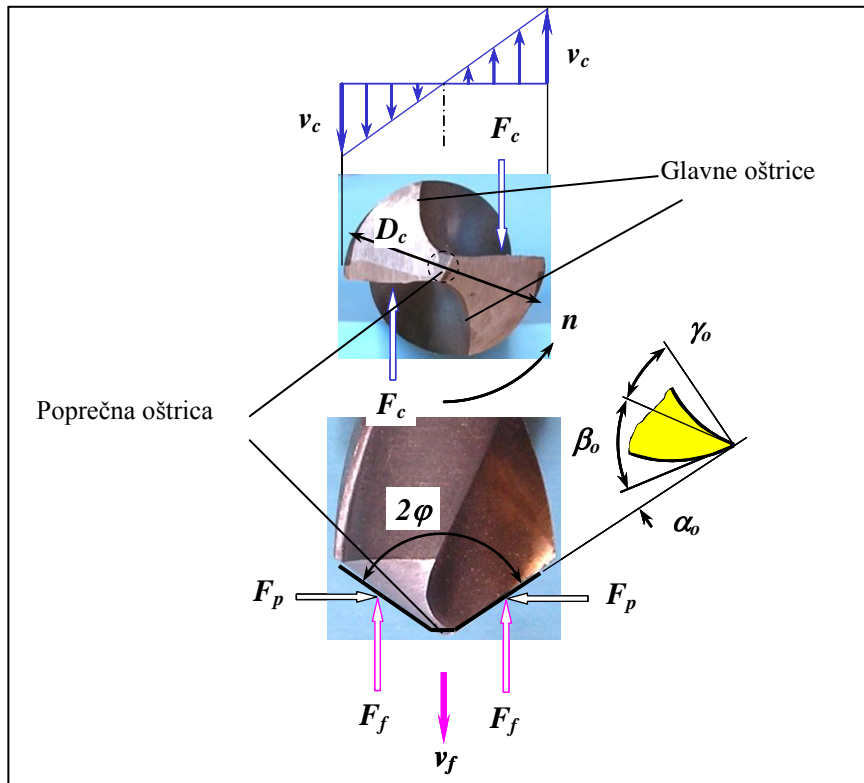
F_p – natražna sila rezanja,

2ϕ – kut vrha svrdla,

α_0 – stražnji kut na vrhu oštrice,

β_0 – kut klina na vrhu oštrice i

γ_0 – prednji kut na vrhu oštrice.

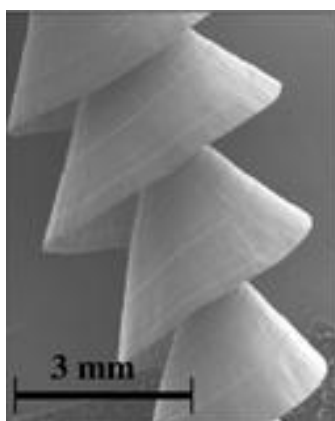


Slika 2.13. Promjena glavne brzine rezanja i kuta rezanja od sredine prema obodu svrdla [1]

Budući da brzina nije ista po cijelom radijusu, tako i količina odvojenog materijala po radijusu nije ista što daje karakterističan oblik odvojene čestice s obzirom na druge procese rezanja. Iako je i kod tokarenja odvojena čestica spiralnog oblika, širina odvojene čestice je približno istog iznosa (osim kod poprečnog tokarenja za male radijuse) jer se brzina u raznim točkama noža u zahvatu ne mijenja puno. Kod bušenja je na vrhu svrdla glavna brzina jednaka nuli (2.5) pa je i širina odvojene čestice na raznim udaljenostima od osi rotacije na oštrici svrdla različita.



Slika 2.14. Oblik odvojene čestice kod tokarenja [14]



Slika 2.15. Oblik kontinuirane (neisprekidane) odvojene čestice kod bušenja [15]

Kod proširivanja već postojećeg provrta nema područja gdje je glavna brzina rezanja v_c jednaka nuli.

2.2.4. Promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice

Zbog utora u svrdlu, čija je funkcija odvođenje odvojene čestice, dolazi do promjene kutova na glavnoj oštrici svrdla. Proces rezanja kod spiralnih svrdala za jednu od glavnih reznih oštrica u razvijenom obliku i to na obodu svrdla shematski je prikazan na slici Slika 2.16 [10]. Na slici Slika 2.16 je prikazano:

- a) slobodni i prednji kut na vrhu svrdla,
- b) slobodni kut u odmotnom obliku i
- c) prednji kut u procesu rezanja

gdje je:

α – slobodni kut na vrhu,

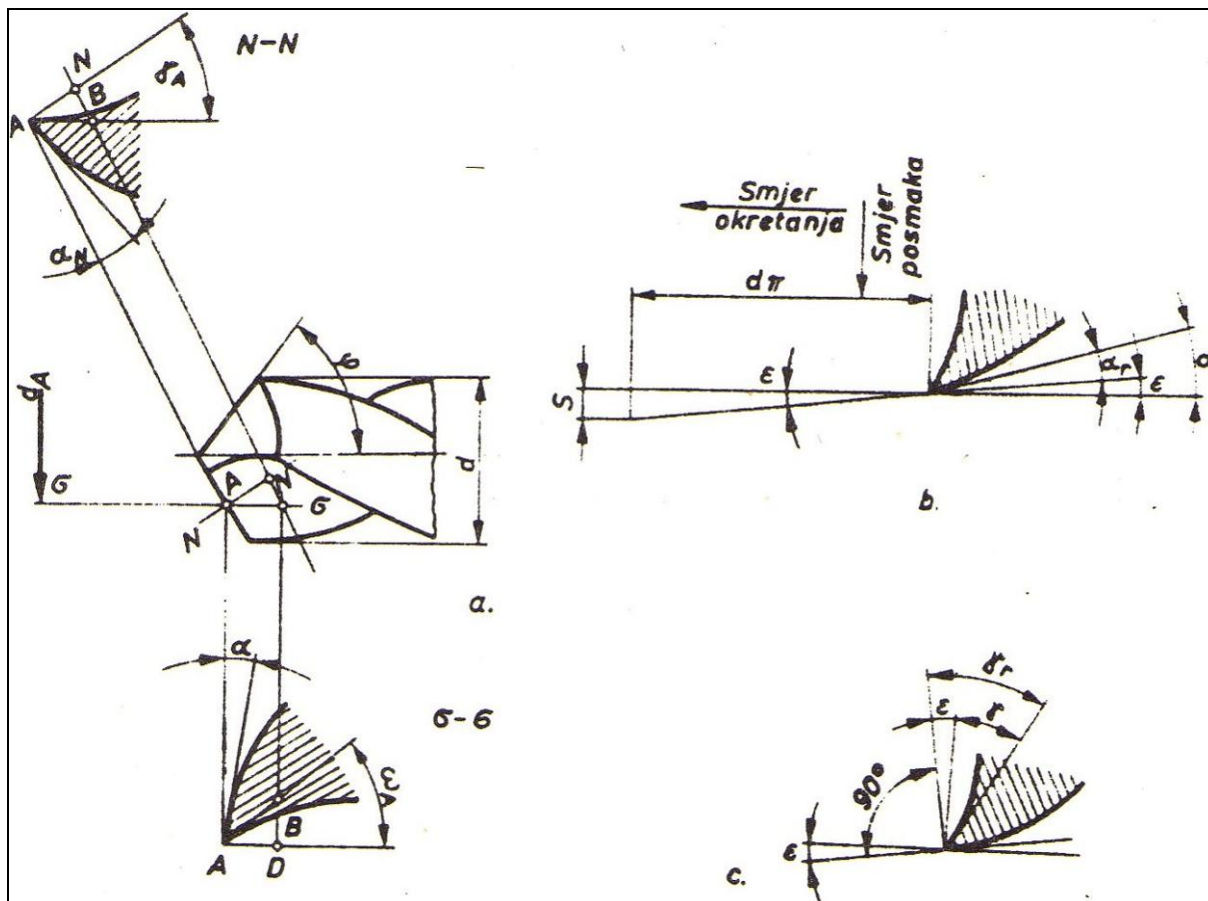
α_r – slobodni kut u procesu rezanja ili kut rada,

β – kut klina,

γ_r – prednji kut u procesu rezanja ili kut rada,

γ – kut uspona spirale i

ε – kut posmaka.



Slika 2.16. Prikaz reznih oštrica i kutova [10]

Povećanjem kuta uspona γ ujedno se i popravljaju uvjeti rezanja te se smanjuje moment uvijanja smanjivanjem glavne sile rezanja. Istovremeno se smanjuje krutost svrdla i trajnost oštrice. Kod manjih svrdala se osobito smanjuje trajnost oštrice [10]. Prednji i stražnji kut i kut klina se također mogu vidjeti i na slici Slika 2.13.

2.3. Materijali svrdla

Vrsta materijala reznog alata određuje se prema potrebi proizvodnosti, režimima, svojstvima svakog oblika alata i uvjetima rada [10].

S obzirom na konkretan slučaj za obradu nekog materijala, bira se materijal alata koji, s obzirom na zadane uvjete obrade i njihovu važnost, najbolje ispunjava postavljene zahtjeve.

Ipak postoje neka svojstva koja su zajednička svim alatima. Dva zahtjeva za rad svih alata pa stoga i za svrdlo su [16]:

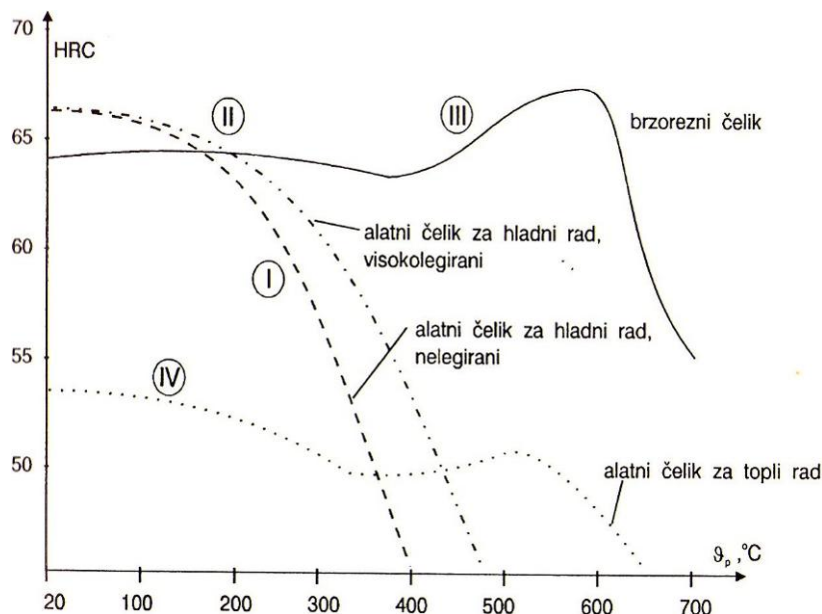
- a) otpornost alata na trošenje i
- b) žilavost.

Za mnoge rezne alate je otpornost na popuštanje također vrlo bitno svojstvo, ali ono nije uvijek bitno [16].

Kako bi se najprije alatni materijal izabrao orijentacijski, traži se optimalna kombinacija dvaju spomenutih zahtjeva, a kad se ona pronađe uzet će se u obzir posebni (sekundarni) zahtjevi. Nerijetko je slučaj da je neko posebno svojstvo alata bitnije nego oba opća svojstva, npr. kemijska postojanost alata za injekcijsko prešanje polimera [16]. Rezni dio svrdla izrađuje se od materijala znatno veće tvrdoće od obrađivanog materijala, a najčešće se koriste brzorezni čelik i tvrdi metal [1].

Brzorezni čelik je skuplji 10 do 15 puta od alatnog čelika, ali ima i daleko veću trajnost i pruža mogućnost obrade znatno većim brzinama, međutim svejedno nije pravilan izbor za sve vrste obrada rezanjem. Na primjer, ručni ureznik radi vrlo malim brzinama pri kojima se ne postižu velike temperature i tu se trajnost brzoreznog čelika neće moći iskoristiti. Stoga je vrlo važno pravilno primijeniti odgovarajuću vrstu reznog materijala [10].

Kod reznih alata koji rade pri povišenim temperaturama posebno je važno svojstvo, otpornost na popuštanje. Otpornost na popuštanje, u užem smislu, znači što manji dekrement tvrdoće povišenjem radne temperature [16]. Toplim radom se smatra kada je alat izložen temperaturama iznad 200 °C [17]. Pri povišenim temperaturama svi čelici u većoj ili manjoj mjeri (ovisno o vrsti i stupnju legiranosti) imaju niži R_m , R_e , i HV nego pri sobnoj temperaturi dok im je žilavost pri povišenim temperaturama u pravilu viša [16]. Na primjer alatni čelici mogu ostati postojani najviše kod temperature od 200 do 250 °C što ih čini skoro alatima za hladni rad.



Slika 2.17. Dijagram popuštanja za različite alatne čelike [16]

Otpornost na habanje je također vrlo bitno svojstvo reznog alata i otpornost mu je veća što mu je veća tvrdoća [10].

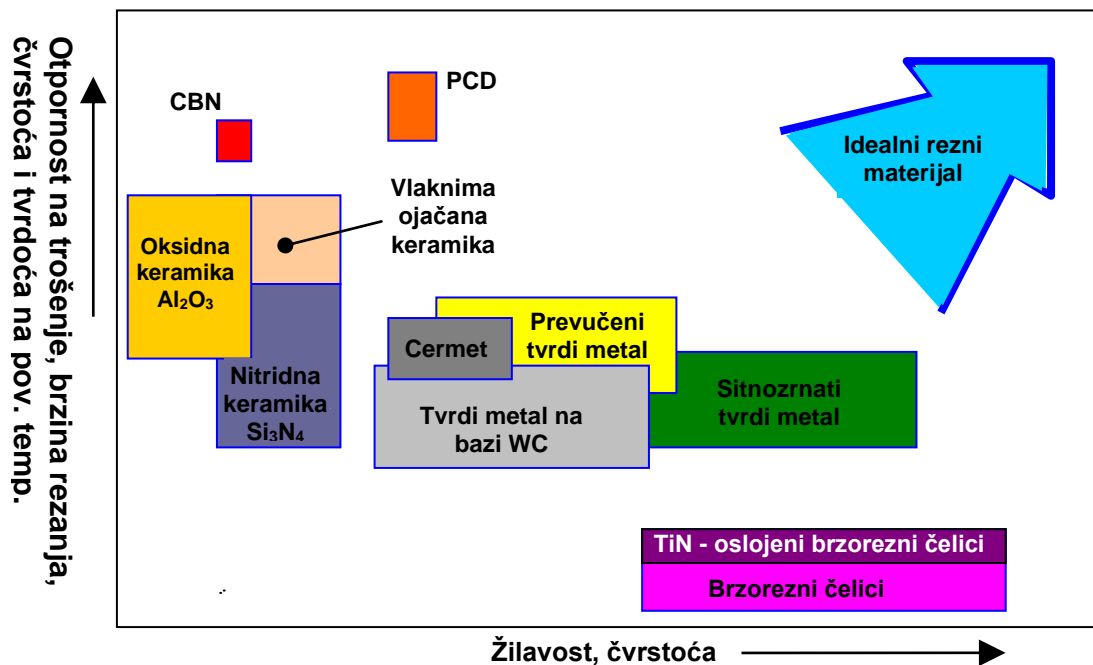
Prokaljivost materijala reznog alata je također vrlo bitno svojstvo. Uz kemijski sastav još je bitnija veličina zrna. Na primjer razvrtalo i ureznik moraju imati tvrdnu površinu, a jezgra im treba ostati žilava, dok je kod svrdla prokaljivost vrlo bitna. Kromovi i brzorezni čelici imaju dobru, dok ugljični alatni čelici imaju lošu prokaljivost [10].

Ne mijenjanje oblika i dimenzija kod toplinske obrade također može biti od velike važnosti, pogotovo ako alat ima fine obrade kao što je razvrtalo ili upuštalo [10]. Kod svrdla za beton je to također važno jer se njime buši rupa određenog promjera te nema naknadne fine obrade. Kao što je prije spomenuto, svrdla moraju biti prokaljena, što znači da cijeli volumen sudjeluje u promjeni dimenzija uslijed toplinske obrade pa se to mora uzeti u obzir. Svrdla za obradu betona su uglavnom izrađena od čelika budući da temperature koje se razvijaju tijekom obrade su daleko manje nego kod obrade metala. Razlog tome su manje brzine obrade zbog neusporedivo manje krutosti kod ručne obrade nego kod strojne. Budući da ugljikovi čelici dosta mijenjaju svoje dimenzije za razliku od npr. kromovih, to je bitno svojstvo [10]. To svojstvo je ipak bitnije za izradu alata nego za odabir.

Materijali oštrice alata mogu biti iz sljedećih skupina alatnih materijala:

- a) alatni čelici,
- b) brzorezni čelici,

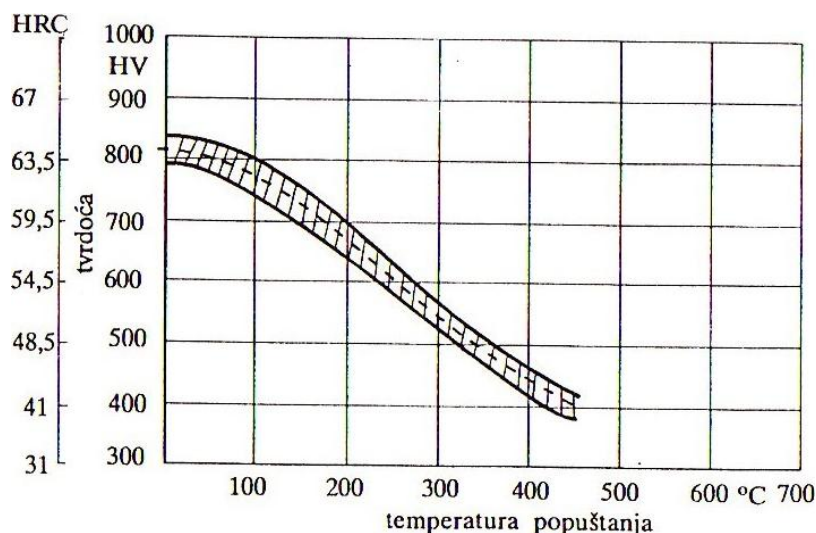
- c) rezna keramika,
- d) tvrdi metali,
- e) cermet i
- f) supertvrdi CBN i PCD.



Slika 2.18. Područja žilavosti i tvrdoće osnovnih vrsta reznih materijala [18]

2.3.1. Alatni čelici

Do kraja 19. stoljeća svi su se alati izrađivali od ugljičnih alatnih čelika. Tek oko I. svjetskog rata počinju se proizvoditi posebni legirani alatni čelici [16]. Od svih reznih materijala imaju najmanju temperaturnu postojanost jer već na temperaturama od oko 350 °C, tvrdoća im sa 55 do 60 HRC opada na 35 HRC, a na temperaturama od oko 400 °C i ispod 20 HRC. U današnjim uvjetima proizvodnje nezamisliva je tako mala brzina rezanja pri kojoj je inače moguća upotreba alatnog čelika kao reznog materijala [19].



Slika 2.19. Ovisnost tvrdoće o temperaturi rada alatnog čelika (oznaka prema DIN) C 45 W (Č1531) [16]

U obradi metala rezanjem alatni čelici se više ne koriste, a zadržali su se samo u obradi drveta, papirnoj industriji itd. [19]. Unatoč brojnim nepovoljnim svojstvima, ugljični alatni čelici su se održali zahvaljujući sljedećim karakteristikama [16]:

- najjeftiniji alatni čelici,
- proizvode se u najvećem asortimanu dimenzija,
- toplinskom obradom se mogu po želji regulirati tlačna zaostala naprezanja u površinskim slojevima alata jer su ovi čelici neprokaljivi,
- jednostavna toplinska obrada,
- temperature austenitizacije su razmjerno niske,
- jeftino sredstvo za gašenje (voda, ulje),
- manje su osjetljivi prema razugljčavanju površine tijekom toplinske obrade nego ostali alatni čelici,
- moguće je parcijalno otvrdnuće (površinski zakaljivi, samo na dijelu ploštine),
- lagana obrada odvajanjem čestica,
- bolje zavarljivi od legiranih alatnih čelika.

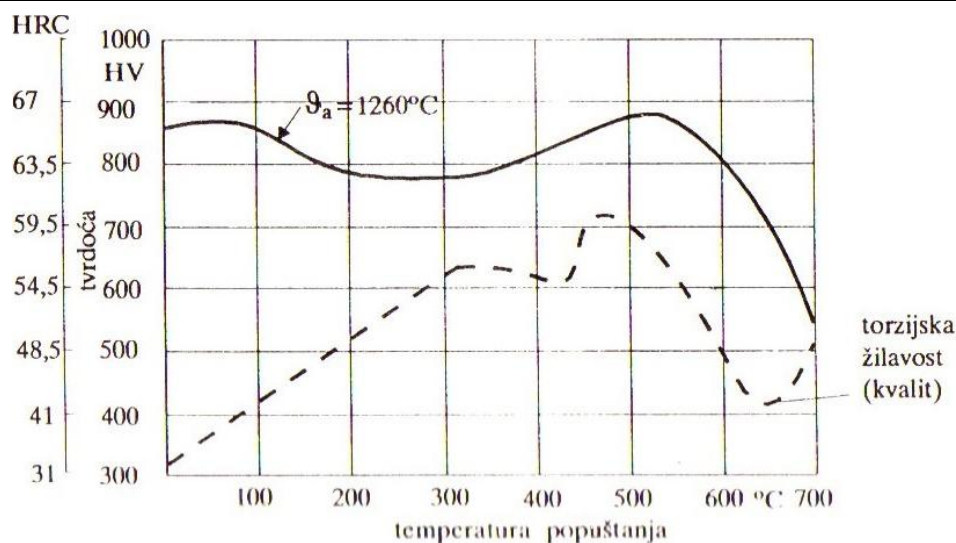
2.3.2. Brzorezni čelik

Brzorezni čelik (Slika 2.7) je otkriven već 1860 godine, ali nije postao aktualan jer se nije primijenila viša temperatura austenitizacije [16]. Kada se brzorezni čelik pojavio, predstavljao je do tada nezamisliv rezni materijal. Dobio je naziv po tome što je u vrijeme njegove pojave bilo moguće vršiti rezanje velikim brzinama pa odatle i njegov naziv High Speed Steel (HSS) (Tablica 2.1). Temperatura rezanja ovisi najviše o glavnoj brzini rezanja

(poglavlje 3.2). Iz slike Slika 2.20 se može vidjeti kako brzorezni čelici imaju višu temperaturu popuštanja nego alatni čelici. Brzorezni čelici su visokolegirani čelici, legirani kromom (Cr), molibdenom (Mo), volframom (W), vanadijem (V), a ponekad i kobaltom (Co) [19]. Njihova konačna verzija je 1904. godine sadržavala 0,7 % C, 18 % W, 4 % Cr i 1,3 % V, čija je verzija aktualna i danas. Osam godina kasnije se spoznao povoljan uvjet kobalta (Co) na „tvrdoću u crvenom žaru“ pa se počelo u sastav brzoreznih čelika dodavati po 5 % Co, i više. Nakon dodatnih 13 godina se spoznao i utjecaj vanadija (V) na otpornost na trošenje, no isto tako i potreba povišenja udjela ugljika, kako bi se spriječilo nastajanje delta-ferita. Pet godina kasnije su otkrivena velika nalazišta molibdena te se razvio čelik sa sastavom 0,8 % C, 1,7 % W, 8,5 % Mo koji ima sličan sastav današnjem (Č7880) [16]. Rezne sposobnosti HSS dobiva pravilno provedenom i veoma pažljivo praćenom toplinskom obradom. U usporedbi s reznim materijalima koji imaju veću temperaturnu postojanost i tvrdoću, kao npr. tvrdi metal (TM), HSS ima neke prednosti, kao što je velika žilavost te laka obradivost u meko žarenom stanju. Međutim ove prednosti ipak nisu dovoljne s obzirom da brzorezni čelik ima manju otpornost na trošenje i mnogo manju temperaturnu postojanost u odnosu na neke druge rezne materijale [19].

Tablica 2.1. Ekonomična brzina rezanja i sastav ugljičnog i brzoreznog čelika [16]

naziv čelika	sastav, %					ekonomična brzina rezanja, m/min
	C	Mn	Cr	W	V	
alatni (ugljični)	1,05	-	0,2	-	-	5
HSS	0,68	-	5,6	18	1	30



Slika 2.20. Ovisnost tvrdoće o temperaturi rada alatnog čelika (oznaka prema DIN) 1.3355 (Č6880) [16]

2.3.3. Rezna keramika

Keramika je nemetalni materijal dobiven postupkom sinteriranja (srašćivanja). U odnosu na druge industrijske primjene počela se nešto kasnije koristiti kao materijal reznih alata [19]. Tvrda je i ima veliku otpornost na trošenje, ali je također i krhka [1]. Žilavost keramike se može povećati ojačavanjem vlaknima (Slika 2.18). Prva istraživanja i primjena keramike kao reznog materijala datiraju još od početka 20. stoljeća. Međutim, velika krhkost prvih vrsta bila je glavna prepreka za širu industrijsku primjenu [19].

Proizvodnja rezne keramike se sastoji u očvršćivanju pripremljenog praha i sinteriranju sa ili bez djelovanja sile. S obzirom na sastav postoje dvije vrste rezne keramike [19]:

- a) keramika na bazi aluminij oksida (Al_2O_3) – oksidna keramika i
- b) keramika na bazi silicij nitrida (Si_3N_4) – nitridna keramika ili neoksidna keramika.

Keramika na bazi Al_2O_3 je bijele boje i električki vodljiva. Ima vrlo visoku toplinsku vodljivost za keramiku $\approx 30 \text{ W/mK}$, što je dobro kod primjene za rezne alate jer smanjuje toplinska naprezanja zbog manje razlike temperature između površine i jezgre alata [20]. Njena cijena je također relativno niska zbog čega se često primjenjuje u inženjerstvu [21]. Njenu primjena kod reznih alata podržavaju i sljedeća svojstva [18]:

- a) visoka čvrstoća i tvrdoća,
- b) temperaturna stabilnost,
- c) korozijska postojanost pri povišenim temperaturama.

Keramika na bazi Si_3N_4 je crne boje i ima najveću tvrdoću među svim keramikama. Vrlo je otporna na toplinski šok budući da kao i ona na bazi Al_2O_3 ima relativno visoku toplinsku vodljivost ($\approx 16\text{...}33 \text{ W/mK}$) za keramiku [22, 23]. Ima veliku otpornost na puzanje i dobru žilavost [22]. To sve izdvaja ovu vrstu keramike kao najbolji rezni keramički materijal [19].



Slika 2.21. Rezne pločice od keramike: bijele – Al_2O_3 , crne Si_3N_4 [24]

2.3.4. Tvrđi metal

Tvrđi metal (TM) predstavlja rezni materijal koji se danas najviše koristi u metaloprerađivačkoj industriji. Tvrđi metal je sinterirani materijal sastavljen od karbida (K) volframa (W), titana (Ti), tantalata (Ta), niobija (Nb), molibdena (Mo) i vezivne metalne osnove, najčešće kobalta (Co). Skoro sve vrste tvrdog metala sadrže volframov karbid (WC), sa ili bez dodatka titanovog (TiC) i/ili tantalovog (TaC) karbida. TM spada u grupu veoma tvrdih materijala otpornih na trošenje i postojanih na visokim temperaturama. TM je prvo razvijen s WC i Co sastavom. Danas negdje oko 50 % ukupne godišnje svjetske proizvodnje TM otpada na proizvodnju TM kao reznog materijala.

Volframov karbid (WC) ima vrlo visoku tvrdoću i jedan je od glavnih proizvoda na bazi volframa. WC ima tvrdoću 3500 HV i talište na 2870 °C [25].

Titanov karbid (TiC) je uz vanadijev karbid (VC) jedan od najtvrdih materijala općenito. TiC ima tvrdoću 3500...5000 HV (ovisno o načinu rasta prevlake na alatu), a VC 5000 HV (dijamant 6000 HV) [26]. SiC, također ima visoku tvrdoću, oko 4500 HV.

Tantalijev karbid je tamnosive boje i dobije se sinteriranjem iz praha koji je smeđe boje. Veoma je tvrd i krhak, elektrovodljiv, često se koristi kao dodatak volfram karbidu (WC) i ima vrlo visoku točku tališta, 3880 °C. Višu temperaturu taljenja ima samo tantalij-hafnij-karbid, koja iznosi 4215 °C [27].

Poseban segment u razvoju reznih materijala koji zauzima veoma značajno mjesto je razvoj tehnike nanošenja površinskih prevlaka na tvrdi metal. Svrha površinskih prevlaka je povećanje tvrdoće površine, smanjenje trenja, a zadržavanjem žilavosti jezgre alata, postiže se veća izdržljivost u radu. TM s ovakvim prevlakama naziva se prevučeni tvrdi metal. Postupci koji se primijenjuju su CVD (Chemical vapor deposition – postupak kemijskog nanošenja iz parne faze) i PVD (Physical vapor deposition – postupak fizikalnog nanošenja iz parne faze). Pločice se prevlače s aluminijskim oksidom (Al_2O_3), titan-nitridom (TiN), titan-karbidom (TiC), titan-karbonitridom (TiCN), titan-aluminijskim nitridom (TiAlN), a debljine slojeva su od 4 do 6 μm i nanose se jednoslojno ili višeslojno [19]. Ove prevlake i materijali omogućuju brzine rezanja i do 500 m/min [28].



Slika 2.22. Rezne pločice od tvrdog metala [29]

2.3.5. Cermet

Cermet predstavlja mješavinu metala ili legure s najmanje jednom keramičkom fazom. Ime im je složenica početnih slova kombinacije CERamic/METal. Najčešće se za cermet koristi izraz metalna keramika. Cermet je materijal dobiven praškastim sinteriranjem isto kao i TM. Iako postoji prisutstvo keramičke faze cermet nije ni tvrdi metal ni keramika. Cermet nije klasičan TM, ali nije ni klasična keramika. Rezne karakteristike cermeta su [19]:

- a) velika otpornost na trošenje,
- b) velika kemijska stabilnost i tvrdoća na povišenim temperaturama,
- c) mala sklonost stvaranju naljepka i
- d) relativna otpornost na oksidacijsko trošenje.

Velika otpornost na trošenje i velika stabilnost i tvrdoća na povišenim temperaturama su karakteristike koje poprima od keramike, a žilavost je svojstvo koje poprima od metala. Metal je vezivo za okside, boride ili karbide, a kao materijal veziva se koriste nikal (Ni),

molibden (Mo) i kobalt (Co) [30]. Tek se u budućnosti očekuje veća primjena ovog reznog materijala. Glavni pravac razvoja je poboljšanje čvrstoće i žilavosti [19].

2.3.6. Kubični bor nitrid

Kubični bor nitrid (CBN) je supertvrđi materijal. Sastoji se od istog broja atoma bora i dušika (BN) [31]. CBN se primjenjuje pri izradi kalupa i alata za oblikovanje te pri obradi kaljenih čelika i sivog lijeva. Postojan je na temperaturama do 1500 °C [6] i ima izuzetne rezne sposobnosti. Velika tvrdoća i otpornost na trošenje su rezultat njihovih karakteristika [19]. Drugi je po redu najtvrđi materijal koji se primjenjuje za rezne alate (Slika 2.18) [1]. Osigurava dugu trajnost alata i visokobrzinsku obradu (VBO) za kaljeni čelik i čelični lijev. CBN također ima i dobru toplinsku vodljivost [32]. CBN je vrlo skup i moguće ga je koristiti kao prevlaku samo kod jednostavnih geometrija. Iako je njegova cijena oko 10 do 15 puta skuplja od cijene tvrdog metala, trajnost mu je veća od 50 do 100 puta, što ga čini visoko isplativim reznim materijalom [33]. Prevlaka od CBN-a mora imati također vrlo tvrdi podlogu tako da se koristi podloga od kaljenog čelika i SiC [26, 34]. Debljina prevlake CBN sloja je ograničena na par desetinki mikrometara, odnosno na par stotina nanometara zbog velikih unutrašnjih tlačnih naprezanja, slabe prionjivosti na površinu te slabe dugoročne stabilnosti [34].

2.3.7. Polikristalni dijamant

Kao što je poznato, najtvrđi poznati materijal je prirodni dijamant. Ono što ograničava njegovu veću upotrebu kao reznog materijala je njegova visoka cijena. Dijamant je alotropska modifikacija ugljika u obliku kubične kristalne rešetke. Sinteriranjem je moguće, na temperaturi oko 2500 °C i tlaku oko 10 000 MPa, dobiti umjetni dijamant. Tako dobiveni dijamant naziva se polikristalni (PCD). PCD se koristi za obradu aluminijske i njegovih legura, magnezija, bakra, cinka, titana, zlata i srebra te nemetalnih materijala kao što su guma, azbest, tvrdi metal i keramika [19]. Čelični materijali se ne smiju obrađivati dijamantnim prevlakama budući da imaju afinitet prema ugljiku [34]. Može raditi na temperaturi do 1300 °C [6]. PCD se nanosi kao prevlaka na rezni alat PACVD metodom (Plasma activated chemical vapour deposition – plazmom aktivirano kemijsko nanošenje iz parne faze) [35]. Iako je PCD skup, pravilnom primjenom osigurava veliku uštedu zbog svojeg dugog trajanja i reznih svojstava [36].

Kao generalna ocjena upotrebe PCD-a i CBN-a možemo reći sljedeće. Ono što je bilo nezamislivo prije 30-ak godina, npr. obrada materijala tvrdoće 50, 60 pa i 65 HRC, upotrebom PCD i CBN alata je postala stvarnost. Izuzetna rezna sposobnost, velika tvrdoća i otpornost na trošenje su njegove glavne karakteristike [19]. I CBN i PCD je isplativo koristiti, ali je pritom potreban oprez budući da uz visoku tvrdoću imaju i veliku krhkost pa je u slučaju loma alata moguća neisplativost njihove primjene, kako zbog mogućih daljnjih oštećenja stroja ili obratka, tako i zbog njihove visoke cijene.

3. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Premda postoji velik broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja [35]:

- a) abrazija,
- b) adhezija,
- c) umor površine i
- d) tribokorozija.

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina [35].

3.1. Trošenje reznih alata

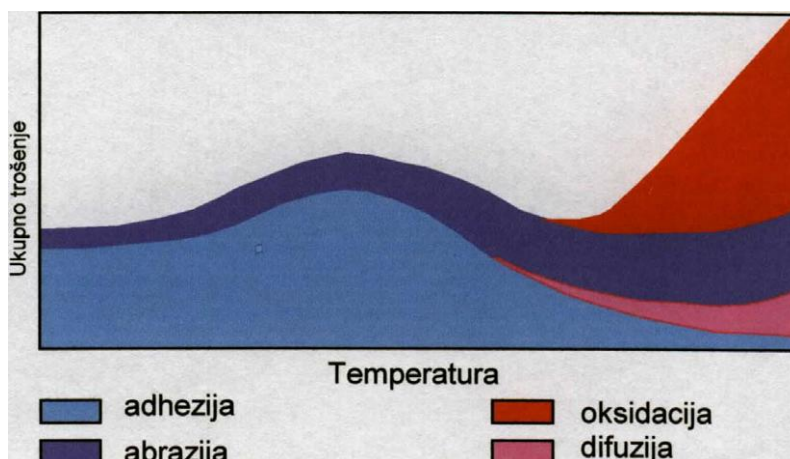
U obradi odvajanjem čestica ipak se koriste neki drugi mehanizmi trošenja od kojih ne spadaju svi pod gore navedene mehanizme, ali su puno značajniji za trošenje reznih alata. Ti mehanizmi trošenja su:

- a) abrazija,
- b) adhezija,
- c) umor površine
- d) oksidacija i
- e) difuzija.

Abrazija i adhezija su mehanički mehanizmi trošenja, a oksidacija i difuzija su kemijski mehanizmi trošenja. Potrebno je istaknuti da se proces trošenja alata pri obradi odvajanjem čestica odvija u vrlo složenim uvjetima. Prisutne su visoke temperature u nestacionarnom temperaturnom polju i visoki pritisci u nestacionarnom polju naprezanja u zoni odvajanja čestica [37].

Na dijagramu prikazanom na slici Slika 3.1 vidljiv je utjecaj temperature na razne mehanizme trošenja. Na nižim temperaturama se vidi kako adhezijski mehanizam trošenja ima najveći utjecaj na ukupno trošenje alata i uz abraziju je jedini oblik trošenja, što je logično jer su pri niskim (sobnim) temperaturama kemijski oblici trošenja neznatni.

Nastajanje difuzijskog trošenja vezano je za temperaturno polje zone odvajanja čestica. Kod nižih temperatura difuzijsko trošenje ne sudjeluje u ukupnoj bilanci trošenja alata, dok je kod viših temperatura ono najznačajnije. [37]. Njegov je utjecaj na višim temperaturama prema slici Slika 3.1 značajniji od svih ostalih zajedno. Visoka temperatura rezanja nije neobična pojava i kod rezanja betona, pogotovo zbog, kako je već rečeno, njegove slabe toplinske vodljivosti.



Slika 3.1. Ovisnost raznih mehanizama trošenja o temperaturi [1]

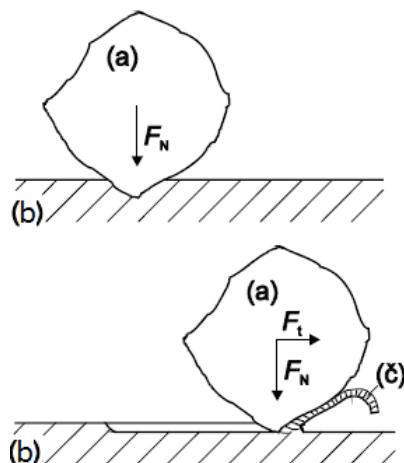
3.1.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja (Slika 3.2).

Jedinični događaj abrazije su: [35]

I faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (b) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N ,

II faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t .



Slika 3.2. Jedinični događaj abrazije [35]

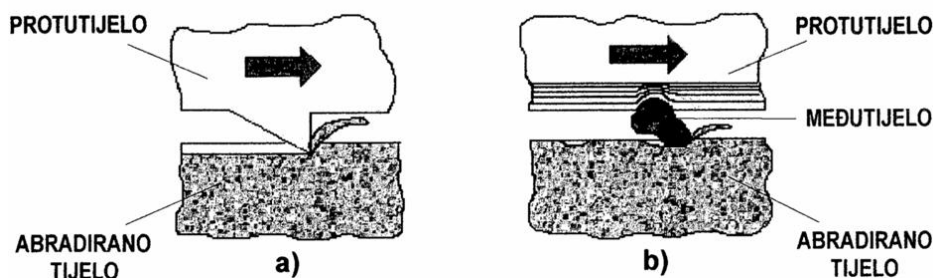
Otpornost na I fazu mehanizma abrazije (prodiranje abraziva u površinu materijala) određena je s više utjecajnih čimbenika, a najznačajniji je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Mehanizam abrazije moguće je analizirati s nekoliko različitih gledišta [35]:

Na otpornost na II fazu mehanizma abrazije (istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja) najutjecajniji čimbenik je način napredovanja pukotine koji općenito može biti [35]:

- a) duktilni,
- b) krhki i
- c) umor površine.

1) Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije (Slika 3.3) [35]:

- a) Abrazija u dodiru dvaju tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo),
- b) Abrazija u dodiru triju tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo) te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.



Slika 3.3. Abrazija: a) u dodiru dvaju tijela, b) i triju tijela [35]

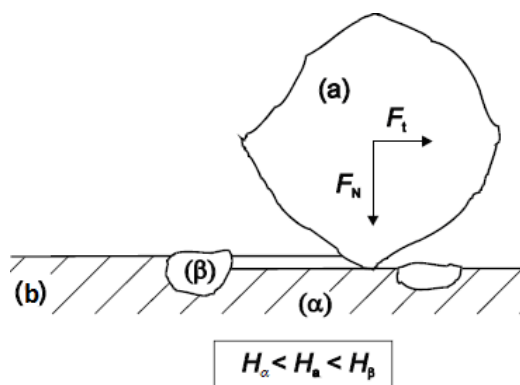
Prema rezultatima više istraživanja odnošenje materijala u dodiru s tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dva tijela. Razlog tomu je što čestice abrazije samo oko 10 % vremena provode u odnošenju materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru [35]. Ako se gleda prednja i stražnja površina alata, kod bušenja one uvijek dolaze u dodir s čvrstim (neodrezanim) materijalom što je slučaj abrazije dvaju tijela.

2) Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja [35]:

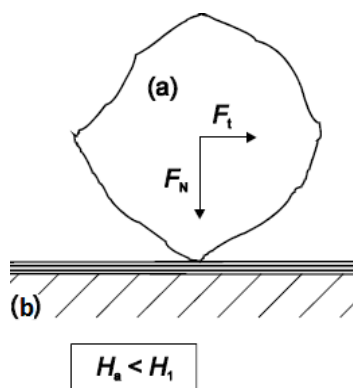
- a) Čista abrazija – čista abrazija (Slika 3.2) djeluje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (b). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine kada je abradirani materijal krhak.
- b) Selektivna abrazija – selektivna abrazija (Slika 3.4) djeluje kada u abradiranom materijalu (b) postoji tvrđa faza (β) od abraziva (a). Abraziv “reže” samo zahvaćeni sloj mekše faze (α). Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze.
- c) Nulta abrazija – nulta abrazija (Slika 3.5) nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskoga graničnoga sloja. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenima različitim postupcima oplemenjivanja površine (boriranje, vanadiranje, CVD, PVD, itd.)

gdje je:

H – tvrdoća.

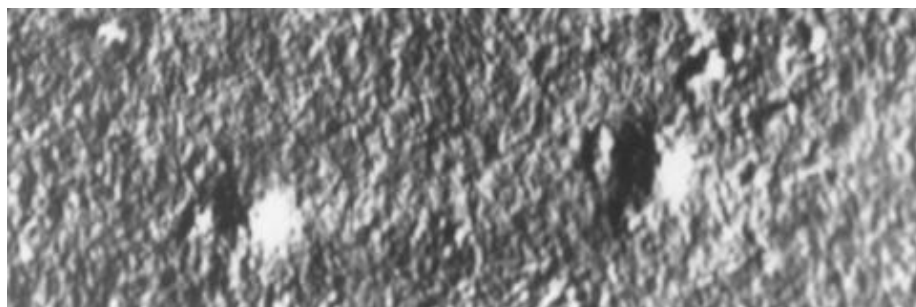


Slika 3.4. Selektivna abrazija [35]



Slika 3.5. Nulta abrazija [35]

Kako je tvrdoća reznih alata ili njegovih vanjskih prevlaka uvijek puno tvrđa od materijala koji se obrađuje, nulta abrazija je oblik abrazivnog trošenja reznih alata.



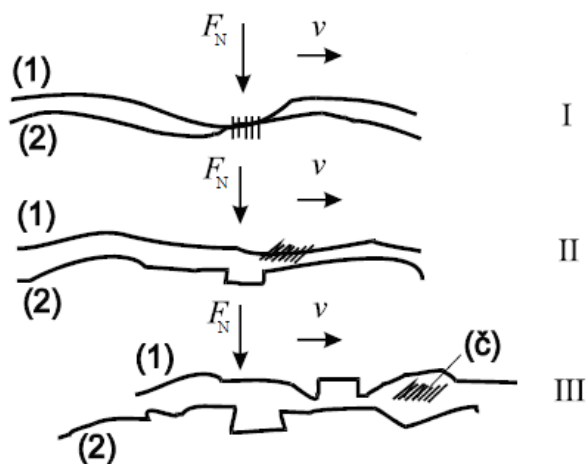
Slika 3.6. Površina potrošena djelovanjem nulte abrazije [35]

3.1.2. Adhezija

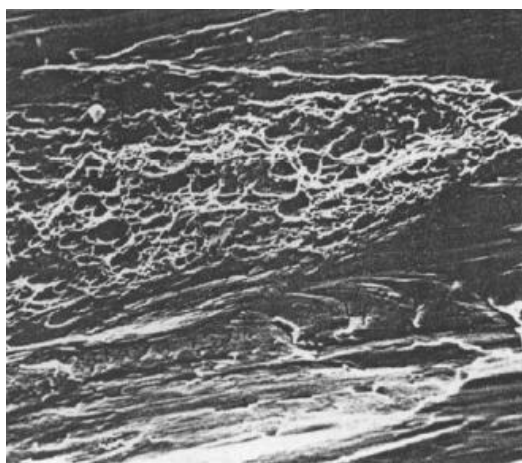
Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze (Slika 3.7) [35].

- I faza - nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina,
- II faza - raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano “nalijepljena” na jednom članu kliznog para,
- III faza - otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast.

Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno “nalijepljene”, odnosno navarene na drugu kliznu površinu. Izgled površine s koje su iščupane čestice i čestice spontano navarene na suprotnu površinu prikazani su na slici Slika 3.8.



Slika 3.7. Jedinični događaj adhezije [35]



Slika 3.8. Površina s koje su adhezijom iščupane čestice [35]

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost [35].

Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru. Suprotna je metalurškoj kompatibilnosti, tj. uzajamnoj topljivosti metala u krutom stanju. Tribološka kompatibilnost pojedinih kombinacija materijala prikazana je Rabinowitzovom kartom tribološke kompatibilnosti na slici Slika 3.9 [35].

- 4 - dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1 %
- 3 - dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju veća od 0,1 %, ili jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1 %
- 2 - jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju između 0,1 i 1 %
- 1 - jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju preko 1 %

□ - nema podataka

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb
In				2	2				1	2	2	1	1	4	2	1	1	1	1
Pb	3	3	4	4	4	4	4	1	1	1	4	3	2	4	4	2	2	1	
Sn	2		4	2	2	3	2	1	2	1	2	1	1	3	2	3	1		
Cd			2	2	3	3		1	1	2	2	1	1	4	1	1			
Mg		2		2	3	3	3		1	3	1	1	1	1	2				
Zn		2	1	1	1	1	3	1	3	2	1	1	1	1					
Al	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1						
Ag	4	3	4	4	4	4	3	1	2	1	2	1							
Au	1	2	1	2	1	1		1	1	2	1								
Cu	3	4	4	1	1	2	3	1	1	2									
Ti	1	1	1	2	1	1	1	1	1										
Zr	2	1	2	1	2	3	1	2											
Pt	1	1	1	1	1	1	1												
Nb	1	1	1	1	1	1													
Fe	1	1	1	1	1														
Ni	1	1	1	1															
Co	1	1	1																
Cr	1	1																	
Mo	1																		

Kompatibilnost		Adhezija
najbolja	4	najlošija
dobra	3	lošija
lošija	2	dobra
najlošija	1	najbolja

Slika 3.9. Rabinowitzova karta tribološke kompatibilnosti, izvedena iz binarnih dijagrama stanja [35]

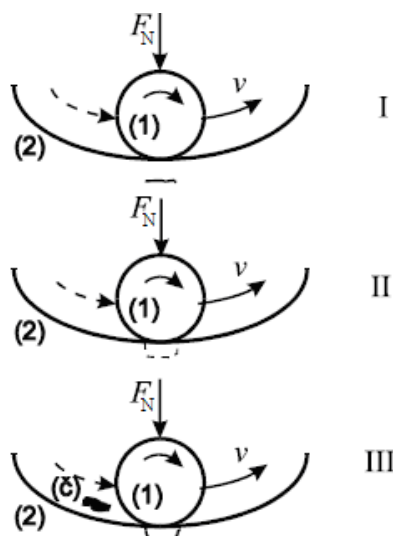
Na tribološku kompatibilnost također povoljno djeluje smanjenje broja kliznih sustava.

- 1 – najlošija kompatibilnost: FCC/FCC
- 2 – loša kompatibilnost: BCC/BCC, BCC/FCC
- 4 – najbolja kompatibilnost: HCP/HCP

3.1.3. Umor površine

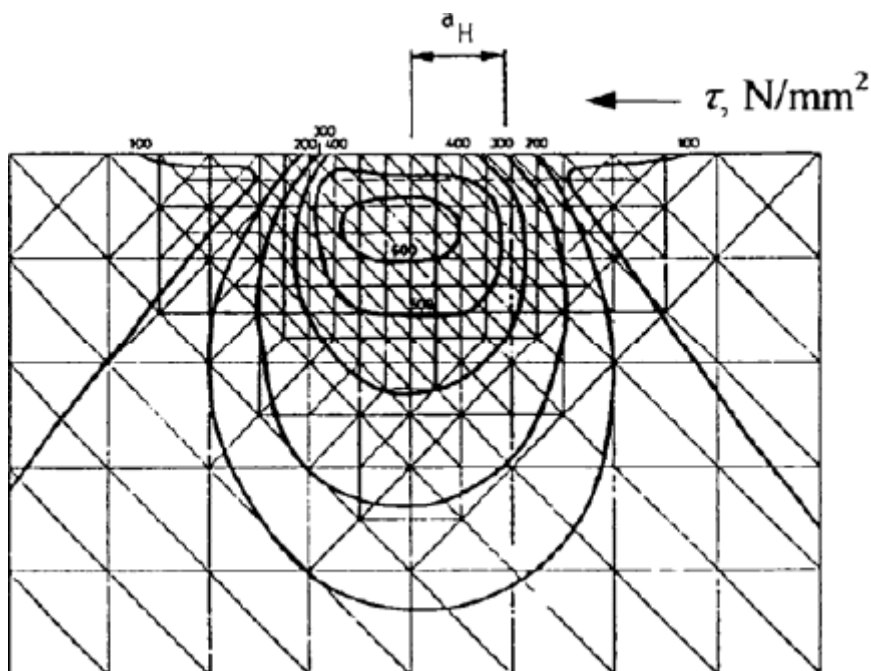
Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja [35]. Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici Slika 3.10 s tri faze.

- I faza - stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine,
- II faza - napredovanje mikropukotine,
- III faza - ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka.



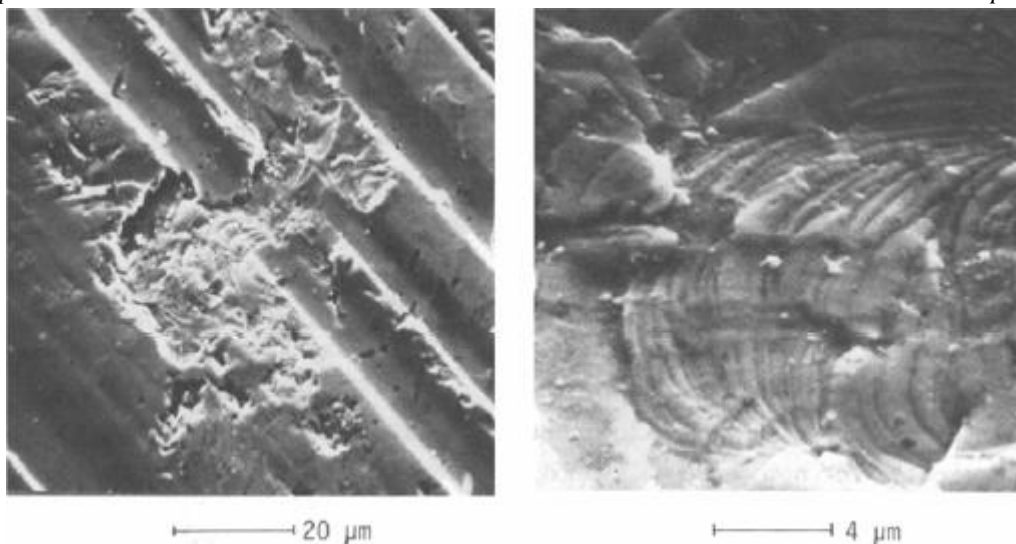
Slika 3.10. Jedinični događaj umora površine [35]

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertzovo naprezanje) uvijek ispod same površine (Slika 3.11). Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica.



Slika 3.11. Raspodjela smičnih naprezanja za slučaj dodira ravnina / valjak i normalnog opterećenja [35]

U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od toga trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje).



Slika 3.12. Izgled površine oštećene umorom [35]

Otpornost na umor površine naziva se i dinamička izdržljivost površine. Ovisi o otporu gibanju dislokacija, a na njega utječe veliki broj čimbenika [35]:

- 1) podpovršinski koncentratori naprezanja,
 - a) oksidi i druge tvrde, krhke uključine,
 - b) sulfidi, karbidi i ostali konstituenti druge faze i
 - c) granice zrna, malokutne granice, granice dvojnika i druge grupacije dislokacija,
- 2) površinska obilježja,
 - a) topografija i tekstura površine,
 - b) zaostala naprezanja,
 - c) razina površinske energije,
 - d) mikrostruktura i
 - e) onečišćenja,
- 3) površinske pogreške,
 - a) uključine i čestice druge faze i
 - b) ogrebotine i udubljenja,
- 4) diskontinuiteti u geometriji dodira,
 - a) odstupanje od linijske geometrije dodira i
 - b) čestice u području dodira,
- 5) raspodjela opterećenja u ležaju,
 - a) elastične deformacije,
 - b) međusobna neprilagođenost dijelova ležaja i
 - c) unutrašnja zračnost, regulacija ležaja,

- 6) elastohidrodinamika,
- 7) tangencijalne sile,
 - a) bez znatnog klizanja,
 - b) kotrljanje uz klizanje.

3.1.4. Oksidacija

Oksidacija ili redukcija su kemijske reakcije pri kojima tvar koja oksidira otpušta elektrone, a tvar koja se reducira prima elektrone. Prvotno se oksidacijom nazivalo spajanje nekog elementa s kisikom (npr. hrđanje željeza, izgaranje ugljena), a redukcijom oduzimanje kisika (npr. pri dobivanju kovina iz njihovih oksida). Danas se u kemijskom smislu oksidacijom naziva otpuštanje, a redukcijom primanje negativnog električnog naboja, što se ostvaruje prijelazom valentnih elektrona s atoma, iona ili molekula druge tvari (redukcija), bilo izravno, bilo na elektrodama galvanskoga članka ili elektrolitske ćelije. Prema tome, kisik ne mora uopće biti sudionik u tim reakcijama. Takve se reakcije nazivaju oksidoredukcijskim reakcijama ili skraćeno redoks reakcijama. Spojevi koji lako podliježu oksidaciji nazivaju se reducirajućim agensima [38].

Te su dvije reakcije nužno povezane i uvijek se zbivaju istodobno, npr. [38]:

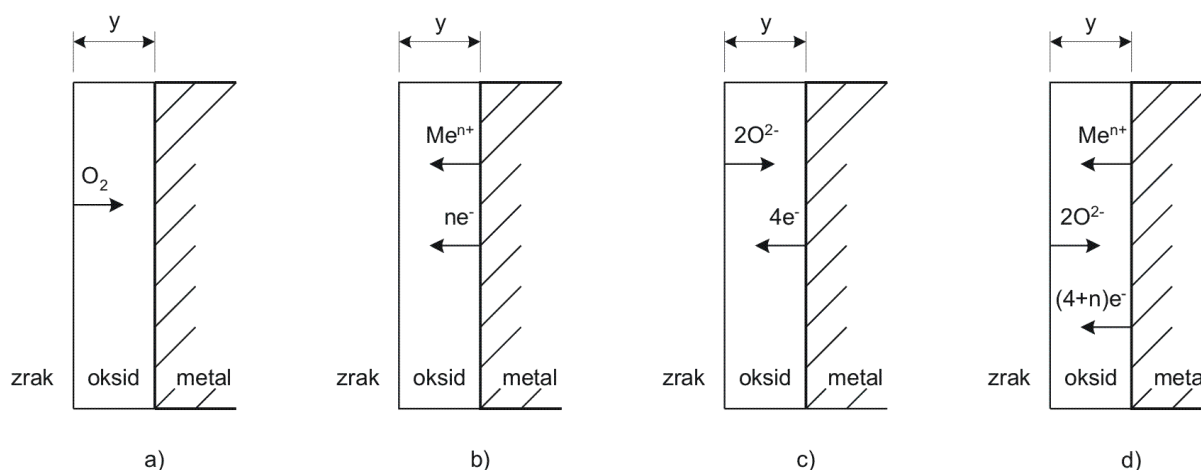
- 1) $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$, oksidacija
- 2) $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$, redukcija
- 3) $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$, ukupna reakcija

Kod alata je slučaj da karbidi predstavljaju mikrokatode, a osnove kao što je kobalt mikroanode. Ovakva struktura čini veliki broj mikrogalvanskih elemenata čiji je mehanizam poznat. Treba reći da je rad galvanskih elemenata vrlo intenzivan na povišenim temperaturama, a isto tako i u prisutstvu odgovarajućih elektrolita [37].

Oksidacija je izravna kemijska reakcija između metala i kisika iz atmosfere. Različiti su mehanizmi nastajanja oksidne prevlake na metalima, a uobičajeno se dijele prema procesu difuzije kroz nastalu prevlaku [39]. Za neke metale sloj oksida pruža zaštitu od daljnjeg okolišnog utjecaja kao npr. za aluminij. Kod ostalih metala oksidna prevlaka puca i ljušti se pa nije zaštitna, kao npr. kod ugljičnog čelika [40]. Kisik nije jedini atmosferski plin s kojim se metali izravno spajaju. Slične posljedice može izazvati kemijska reakcija metala s dušikom ili sumporom iz atmosfere. [39].

Metali i njihove slitine, izloženi zraku na povišenim temperaturama, tvore stabilne oksidne spojeve. Postoji svega nekoliko izuzetaka od ovog pravila kao npr. zlato. Na stabilnost oksida metala ukazuje njihova razmjerno visoka temperatura taljenja u odnosu na talište čistog metala. Aluminij (Al) se tali na $660\text{ }^{\circ}\text{C}$, a talište aluminijevog oksida Al_2O_3 je na $2054\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tanki površinski sloj oksida na nekim metalima može nastati čak na sobnoj temperaturi. Ova kemijska reakcija s kisikom iz atmosfere (oksidacija) može za neke metale biti glavno ograničenje njihove tehničke primjene. Druge metale tanki površinski sloj (film) oksida štiti od daljnjeg okolišnog utjecaja [39].

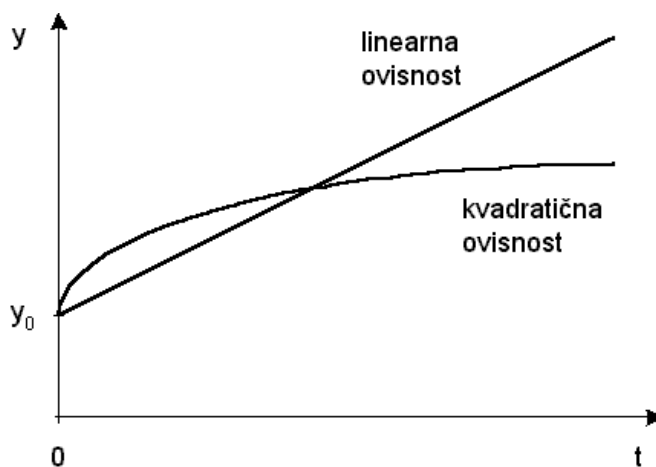
Oksidaciju određenog metala ili slitine obično je moguće opisati jednim od četiri procesa (Slika 3.13). Brzina kojom se na površini metala povećava debljina sloja oksida, prikazana kao y na slici Slika 3.13, presudna je za njegovu tehničku primjenu. Kod nezaštitnog poroznog sloja oksida kisik pritječe približno stalnom brzinom do površine metala.



Slika 3.13. Oksidacija površine metala: a) prolaskom kisika kroz porozni sloj oksida; b), c), d) difuzijom kationa metala ili/i aniona kisika kroz neporozni sloj oksida [39]

Brzina povećanja debljine sloja oksida na površini metala jednaka je nagibu pravca za linearnu ovisnost, odnosno nagibu tangente u točki parabole za kvadratičnu ovisnost. Vidljivo je smanjenje brzine prirasta debljine oksidnog sloja u slučaju kvadratične (korijenaste) ovisnosti. Takvi oksidni slojevi s difuzijom iona kroz sloj pružaju zaštitu metalu od daljnje oksidacije. Valja upozoriti da u rijetkim slučajevima postoje drukčije vremenske ovisnosti povećanja debljine oksidnog sloja, primjerice kod cirkonija (Zr) je kubna ovisnost povećanja debljine sloja oksida s vremenom. Posljedica je to dodatnih mehanizama u difuziji iona kroz sloj oksida. Kod neporoznog sloja oksida (Slika 3.13 b, c, d) difuzija iona se usporava pri povećanju debljine sloja pa je zato ono približno ovisna o korijenu vremena. Na slici Slika

3.14. prikazana je linearna i kvadratična ovisnost debljine sloja oksida y o vremenu t ; y_0 je mala početna debljina sloja oksida.



Slika 3.14. Ovisnost debljine sloja oksida y o vremenu t : a) linearna ovisnost, b) kvadratična (korjenasta) ovisnost [39]

3.1.5. Difuzija

Sastavni dijelovi materijala (atomi, ioni ili molekule), bez obzira na agregatno stanje, podvrgnuti su toplinskom gibanju. Nakon dovoljno vremena, ako spojimo posude s dva različita plina, smjesa će postati homogena. Takva spontana difuzija zbiva se i u tekućinama, ali gibanje molekula je usporeno uslijed međudjelovanja molekula koje su, u usporedbi s plinom, gusto složene. Proces difuzije je oko 1000 puta sporiji od onoga u plinovima. Na osnovi tih činjenica difuzija bi trebala biti nemoguća u savršenom kristalu jer u čvrstim tijelima svaki atom, odnosno ion, ima definirano mjesto u kristalnoj rešetki. Toplinsko gibanje sastoji se samo od titranja oko fiksnog ravnotežnog položaja u rešetki. No pokusi pokazuju da i u čvrstim tijelima dolazi do difuzije iako u manjoj mjeri u usporedbi s tekućinama. Ako se npr. mehanički spoje dva bloka metala, recimo olova (Pb) i zlata (Au), prethodno dobro očišćenih površina i grije nekoliko dana na temperaturi od oko 300 °C, uočava se ulazak olovinih atoma u zlato i obrnuto. Iako je sloj penetracije manji od mikrometra, nesporno je da je proces difuzije postoji. To međutim nije moguće ako pokus pokušamo napraviti s aluminijem (Al) i olovom. Dakle i u kristalnom stanju postoje materijali koji se miješaju (međusobno su topivi) i materijali koji se ne miješaju (nisu međusobno topivi) [41].

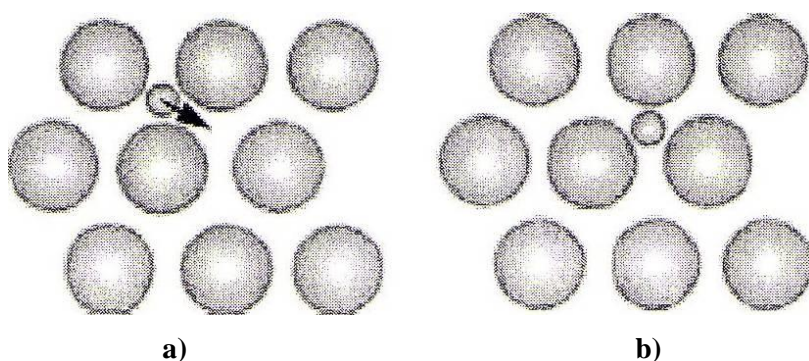
Atom može skočiti u susjedno prazno mjesto rešetke (na mjesto praznine) zahvaljujući temperaturnom titranju. No to nije uvijek moguće, jer se svakim malim pomakom atoma javljaju sile (povratne) koje nastoje vratiti atom u početni položaj. No kako amplitude titranja

nisu konstantne, titranja povremeno mogu dostići dovoljnu energiju da savladaju privlačne sile i atomi preskoče u susjedno prazno mjesto, gdje se priča ponavlja. Ustvari, postoje dva moguća mehanizma [40]:

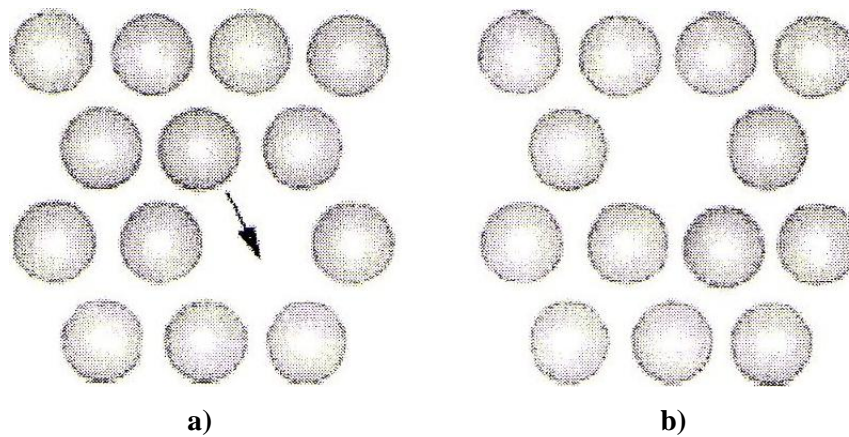
- a) intersticijski mehanizam (difuzija uključinskih atoma) – kada je jedan atom manji od drugoga (Slika 3.15) i
- b) supstitucijski mehanizam (difuzija praznina) – atom prijelazi u susjednu prazninu (Slika 3.16)

Kod intersticijskog mehanizma imamo uvijek prisutna prazna mjesta (drugi intersticijski položaji) [41].

Kod substitucijskog mehanizma imamo slučaj jednakih ili po veličini sličnih atoma. Tada se mora u blizini pojaviti prazno mjesto da bi atom mogao preskočiti i usput mora malo "razmaknuti" atome koji smetaju prolazu [41]. Ukoliko dolazi do izmjene mjesta između vlastitih atoma (atomi jednaki po veličini) i vakancije, riječ je o samodifuziji koja je prisutna kod čistih metala. Kod legura mjesta mogu izmjenjivati atom primjese (atomi slični po veličini) i vakancije u osnovnom elementu. Atom napušta svoje mjesto u rešetki i popunjava susjednu prazninu stvarajući na taj način novu prazninu na prethodnom položaju u rešetki [40].



Slika 3.15. Shematski prikaz intersticijskog mehanizma: a) atom se nalazi u jednoj praznini i giba prema drugoj, b) atom se nalazi u drugoj praznini; (mali atomi se kreću od jednog intersticijskog mjesta do drugog) [40]



Slika 3.16. Shematski prikaz supstitucijskog mehanizma: a) atom se nalazi u jednoj praznini i giba prema drugoj, b) atom se nalazi u drugoj praznini; (izmjene mjesta atomai praznina) [40]

Kod trošenja reznog alata je očito prijelaz atoma s površine rezne oštrice u materijal obratka veći problem nego supstitucijska difuzija [40].

Intezitet difuzije J predstavlja broj atoma ili masu tvari koji prolaze kroz jediničnu površinu u određenom vremenu. Prema prvom Fickovom zakonu vrijedi [40]:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \text{s}} \right] \quad (3.1)$$

gdje je:

D – difuzivnost ili difuzijski koeficijent,

$\frac{dc}{dx}$ – gradijent koncentracije,

a difuzivnost je definirana sljedećim izrazom:

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_d}{RT}} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] \quad (3.2)$$

gdje je:

D_0 – difuzijska konstanta materijala $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right]$

Q_d – aktivacijska energija $\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]$

R – opća plinska konstanta $\left[\frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right]$

T – apsolutna (termodinamička) temperatura [K]

Na intezitet difuzije utječu [40].:

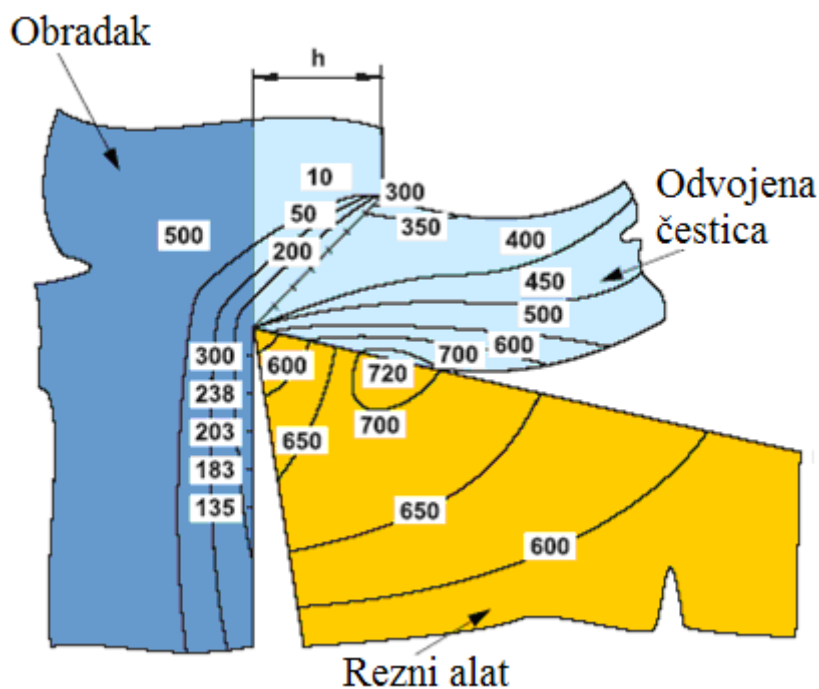
- a) temperatura,
- b) kristalna struktura,
- c) koncentracija tvari koja difundira i
- d) nesavršenost kristala.

3.2. Oblici trošenja reznih oštrica

Budući da su razni dijelovi (površine) alata izloženi različitim uvjetima tijekom obrade, za očekivati je da se ne pojavljuju isti oblici trošenja na svakom od njih. Različiti uvjeti obrade mogu biti manifestirani kao [18]:

- 1) različite brzine rezanja,
- 2) promjenjivi kut rezanja,
- 3) nejednolika pristupačnost SHIP-a,
- 4) nagomilavanje odvojene čestice, itd.

Posljedica promjene tih uvjeta je stvaranje različitih temperatura u zoni rezanja (Slika 3.17). Očito je da, gdje je veća brzina rezanja, npr. na obodu svrdla, da će tamo biti i veća proizvedena toplina u jedinici vremena (Slika 3.17) jer je uz jednoliku specifičnu silu trenja na nekoj maloj površini veći specifični prijeđeni put u toj istoj jedinici vremena. Dio te topline prjelazi na obradak, dio na odvojenu česticu, a dio na alat te mu povećava temperaturu. Kako je pri višim temperaturama difuzijski oblik trošenja najutjecajniji, tako je i raspodjela temperature u zoni rezanja od velikog značenja.



Slika 3.17. Raspodjela temperature u zoni rezanja [1].

Oblici trošenja koji se pojavljuju kod reznih alata su [1]:

- 1) trošenje stražnje površine,
- 2) kratersko trošenje,
- 3) zarezno trošenje,
- 4) trošenje stražnje površine max,
- 5) oksidacijsko zarezno trošenje,
- 6) plastična deformacija,
- 7) naljepak,
- 8) toplinska napuknuća,
- 9) uzdužna napuknuća,
- 10) razgradnja oštrice i
- 11) lom oštrice.

Trošenje stražnje površine je najčešće prouzrokovano prevelikom glavnom brzinom rezanja, tj. premalom otpornosti alata. Smanjenje ovog oblika trošenja može se postići tako da se smanji brzina rezanja ili, ako je moguće, odabere materijal reznog alata koji ima veću otpornost trošenju [1].



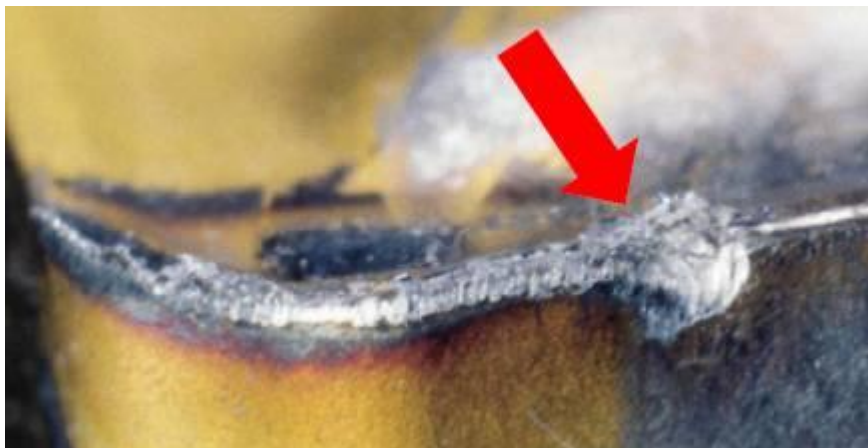
Slika 3.18. Trošenje stražnje površine [1]

Toplinska napuknuća mogu biti prouzrokovana oscilacijama temperature zbog npr. isprekidanog rezanja ili nejednolikog dotoka SHIP-a. Kako je kod bušenja otežani dotok SHIP-a jedna od nepogodnih karakteristika tog procesa, toplinska napuknuća mogu biti značajan problem. Rješenje tog problema može biti ili suha obrada ili odabir žilavijeg reznog materijala alata.

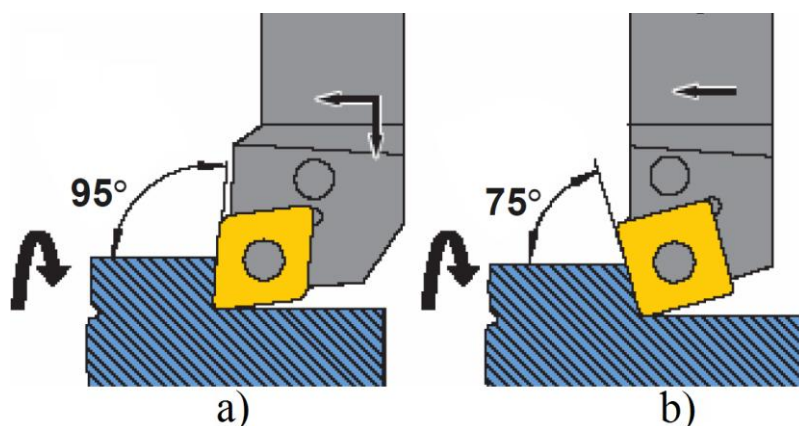


Slika 3.19. Toplinska napuknuća [1]

Zarežno trošenje je kao i trošenje stražnje površine najčešće prouzrokovano prevelikom glavnom brzinom rezanja, tj. premalom otpornošću alata. Kako bi se smanjio ovaj oblik trošenja potrebno je ili smanjiti glavnu brzinu rezanja, ili ako je moguće, odabrati materijal reznog alata koji ima veću otpornost trošenju, a za obratke od kaljenog čelika se može odabrati manji kut prednamještanja alata κ [1].



Slika 3.20. Zarezno trošenje [1]

Slika 3.21. Kut prednamještanja alata κ : a) $\kappa = 95^\circ$, b) $\kappa = 95^\circ$ [1]

Kod bušenja se ne može podešavati kut κ , ali se može odabrati svrdlo s većim ili manjim φ . Manji kut κ bi kod svrdla bilo isto što i povećanje kuta φ , ali treba imati na umu da se njegovim povećanjem povećava i otpor rezanju [6].

Kratersko trošenje je najčešće prouzrokovano previsokim temperaturama i pritiscima na prednjoj površini alata. Kako bi se smanjio ovaj oblik trošenja može se smanjiti glavna brzina rezanja (zbog čega će se smanjiti temperature), smanjiti posmak, izabrati alat veće otpornosti ili izabrati alat pozitivne geometrije [1].



Slika 3.22. Kratersko trošenje [1]

Krzanje oštrice može nastati ako je oštrica prekrhka ili preslaba, a također može biti i izazvano pojavom naljepka na prednjoj površini alata. Kako bi se smanjio ovaj oblik trošenja može se odabrati rezni alat (reзна pločica) veće žilavosti ili jače oštrice (veći kut vrha alata), povećati glavna brzina rezanja, izabrati alat pozitivne geometrije, smanjiti posmak na početku obrade, povećati stabilnost sustava [1].



Slika 3.23. Krzanje oštrice [1]

Naljepak na reznom alatu može nastati zbog preniske temperature nastale tijekom obrade ili velikog afiniteta materijala kao što su aluminij, nehrđajući čelici, niskougljični čelici itd. Rješenja za nastajanje naljepaka mogu biti: povećanje glavne brzine rezanja (veća temperatura), izabrati adekvatniji alat, izabrati pozitivnu geometriju [1]. Kod bušenja betona afinitet između svrdla i betona očito ne postoji kao kod procesa bušenja metala.



Slika 3.24. Naljepak na reznoj oštrici [1]

Lom rezne oštrice nastaje kada se alat previše istroši, ako je slaba kvaliteta alata i/ili slaba geometrija alata, kada su prevelika naprezanja na alatu ili zbog velikog formiranja naljepaka. Rješenja za ovaj oblik trošenja su: smanjiti posmak, smanjiti dubinu obrade, izbor alata s jačom i jednostavnijom geometrijom, izbor debljih i većih alata/pločica i izbor žilavijeg alata/pločica [1].



Slika 3.25. Lom oštrice reznog alata [1]

Plastična deformacija rezne oštrice se može pojaviti prilikom prevelikog trošenja, slabe kvalitete i/ili geometrije alata, prevelikog naprezanja i velikog formiranja naljepka. Smanjenje ovog oblika trošenja se može postići smanjenjem posmaka, smanjenjem dubine rezanja, izborom jače geometrije alata, odabirom jednostavnije oštrice, izborom debljih i većih pločica i izborom žilavijeg alata/pločica [1].



Slika 3.26. Plastična deformacija rezne oštrice [1]

3.3. Trajanje oštrice reznog alata

Trajanost reznog alata se definira kao vrijeme koje alat izdrži između dva brušenja (ako se radi o alatu od alatnog čelika), odnosno vrijeme dok se alat ne zatupi [18]. Ta definicija se odnosi na rezne alate napravljene od alatnog ili brzoreznog čelika koji se mogu brusiti. Ako je rezna oštrica prevučena raznim prevlakama CVD, PVD i drugim metodama, ili ako je čak i nitrirana, ona se više ne može brusiti, već se zamjenjuje novim alatom (reznom pločicom) [16,17].

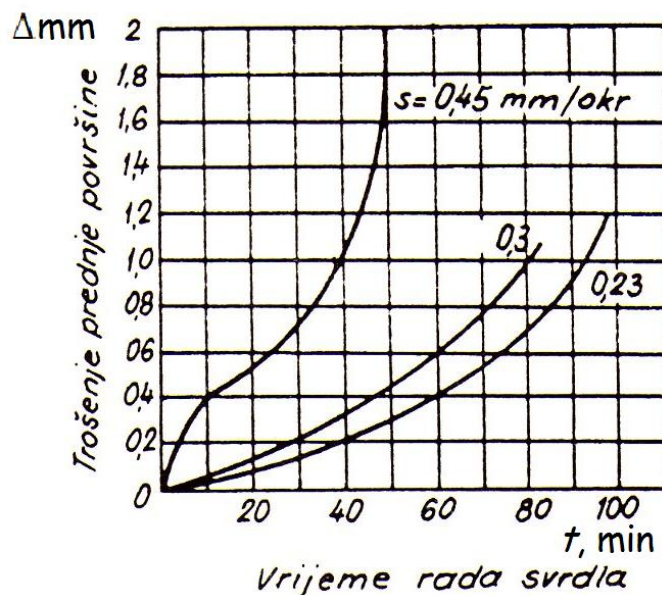
U procesu bušenja, svrdlo se troši, a pogotovo njegov rezni dio. Trošenje svrdla se može pojaviti u dva oblika [6]:

- a) potpuno istrošenje (lom oštrice) i
- b) relativno istrošenje – kod kojeg se rezna sposobnost svrdla toliko smanji da nastupaju teškoće kod daljnjeg rada.

Potrebno je odrediti kada je svrdlo istrošeno u toj mjeri da je potrebno njegovo brušenje. Svrdla se, kao i drugi rezni alati, troše kao rezultat trenja stražnje površine alata o površinu rezanja, odvojene čestice o prednju površinu, alata o površinu provrta i gnječenje poprečne oštrice.

Ovisno o tome kakvo je zatupljenje svrdla nastupilo, imamo porast momenta ili aksijalne sile ili i jednog i drugog. U slučaju trošenja poprečne oštrice imamo brzi porast posmične sile, a u manjem iznosu se povećava moment. Kod trošenja na uglovima nastaje povećanje momenta i posmične sile. Trošenje stražnje površine svrdla je neravnomjerno, na obodnom dijelu je najveće, a u blizini poprečne oštrice je najmanje. Najnepovoljniji slučaj trošenja je trošenje uglova i ruba svrdla jer su na tim mjestima najveći pritisci i najveće brzine rezanja.

Dužina trošenja stražnje površine može se uzeti kao kriterij zatupljenja svrdla. Na slici Slika 3.27 se vidi kako raste istrošenje stražnje površine u ovisnosti o vremenu rada svrdla za različite posmake s . Kad je posmak manji, i istrošenje svrdla je manje.



Slika 3.27. Prikaz istrošenja slobodne površine svrdla za različite posmake u zavisnosti o vremenu [6]

U tablici Tablica 3.1 prikazane su dozvoljene vrijednosti istrošenja svrdla izrađenog od brzoreznog čelika, a u tablici Tablica 3.2 ako alat ima oštrice od tvrdog metala.

Tablica 3.1. Dozvoljeno istrošenje svrdla od brzoreznog čelika [6]

Materijal obratka	Promjer svrdla D , mm	Dozvoljeno istrošenje B , mm	
		na stražnjoj površini	na prijelazu
Čelik, rad sa hlađenjem	≤ 20	0,6...0,8	-
	> 20	0,8...1	
Lijevano željezo, rad bez hlađenja	≤ 20	-	0,5...0,8
	> 20		0,8...1,2

Tablica 3.2. Dozvoljeno istrošenje svrdla s pločicama od tvrdog metala [6]

Materijal obratka	Promjer svrdla D , mm			
	10...12	13...18	19...25	26...30
Čelik nekaljen, lijevano željezo	Dozvoljeno istrošenje B , mm			
	0,4	0,6	1	1,3

Vijek trajanja alata (t) je vrijeme neprekidnog rada alata između dva oštrenja. Znači mjeri se vrijeme rada alata kod svih postupaka osim kod bušenja gdje se mjeri dubina bušenja

[37]. Karakteristična brzina rezanja koja nam određuje vijek trajanja svrdla je brzina $v_{L\ 2000}$. To je brzina pri kojoj možemo (pod određenim uvjetima rada i ispitivanja) izbušiti provrte ukupne dubine od 2000 mm bez ponovnog oštrenja. Kod toga se ne uzima kao mjerilo vijeka trajanja svrdla vrijeme, već put L . Jednadžba kojom se definira ovisnost brzine rezanja od puta bušenja L kod konstantnog posmaka s glasi [6]:

$$v_c L^n = C_L [-] \quad (3.3)$$

gdje je:

L – put bušenja u smjeru posmaka, tj. dubina bušenja [m],

n – Taylorov eksponent za bušenje,

C_L – Taylorova konstanta za bušenje.

Ova jednadžba je slična Taylorovoj jednadžbi za trajanje rezne oštrice kod drugih konvencionalnih metoda, ali su vrijednosti konstanti n i C_L različite. Na taj način umjesto zavisnosti $t-v_c$ kao kod npr. tokarenja, dobijemo zavisnost $L-v_c$. Na temelju eksperimentalnih mjerenja došlo se do zaključka da konstanta n poprima vrijednost između 0,125 i 0,45 ovisno o materijalu obratka. Maksimalna glavna brzina rezanja koja se smije primijeniti za neko svrdlo ovisi o [6]:

- a) materijalu obratka,
- b) materijalu reznog dijela svrdla,
- c) vijeku trajanja svrdla,
- d) promjeru svrdla,
- e) dubini bušenja,
- f) geometriji svrdla i
- g) hlađenju svrdla.

Promjer svrdla na maksimalnu brzinu rezanja ima sljedeći utjecaj. Kod istog vijeka trajanja i nepromijenjenih drugih uvjeta svrdlo većeg promjera dozvoljava veće brzine rezanja od svrdla manjeg promjera. Već je rečeno da se povećanjem glavne brzine rezanja povećava i temperatura obrade. To se može objasniti time što se većim promjerom svrdla povećava njegova masa, odvođenje topline je bolje, povećava se utor za odvod česticama i dovođenje SHIP-a do oštrice svrdla. Također su deformacije u radu manje kod svrdla većeg promjera. Tanka i dugačka svrdla najviše su izložena deformacijama [6].

Povećanjem posmaka kod bušenja nužno je smanjiti glavnu brzinu rezanja ako želimo zadržati isto vrijeme trajanja alata. Isto je i kod tokarenja [6]. Naravno da glavna brzina rezanja ima najveći utjecaj na vijek trajanja alata pa se posmak može povećati u većoj mjeri nego što se smanji glavna brzina rezanja [1].

Utjecaj dubine bušenja, kao i promjer svrdla, dobiveno je eksperimentalnim ispitivanjima. Također je dobiveno da se povećanjem dubine bušenja vijek trajanja svrdla smanjuje. To izazivaju promijenjeni uvjeti rada kod većih dubina bušenja, a oni se sastoje od [6]:

- a) otežanog odvoda generirane topline,
- b) povećanje trenja između odvojenih čestica i utora svrdla i
- c) otežanog dovoda SHIP-a do oštrice svrdla.

Te se promjene pojavljuju za dubine bušenja $l > 3d$.

Mnogobrojna ispitivanja su pokazala da promjena oblika brušenja spiralnih svrdla u znatnoj mjeri smanjuje njihove nedostatke, a samim tim povećava vijek trajanja svrdla i dozvoljenu brzinu rezanja. Izbrušenjem poprečne oštrice smanjuje se aksijalna sila i okretni moment svrdla u usporedbi s normalnim neizbrušenim svrdlom [6].

Utjecaj hlađenja na trajnost, odnosno brzinu rezanja kod bušenja također nije od manjeg značaja nego kod tokarenja. Osobito je važna primjena hlađenja kod bušenja metala. Kod bušenja možemo hlađenjem povećati dozvoljene brzine rezanja za 40 – 50 % [6].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela rada je odrediti materijal spiralnog svrdla i analizirati tragove trošenja na svim karakterističnim dijelovima. Svrdlo je korišteno u privatne svrhe, odnosno nije profesionalno. Promjer svrdla je $d=8$ mm, duljina $l_3=158$ mm, a ukupna duljina $l=224$ mm. Svrdlo je staro otprilike godinu i pol dana i njime je probušeno oko 200 rupa.



Slika 4.1. Svrdlo na kojem su se vršila ispitavanja

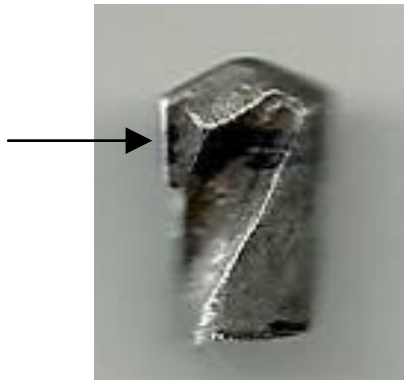
4.1. Određivanje materijala alata

Zadatak ovog eksperimentalnog dijela je odrediti materijal od kojega je izrađeno svrdlo. Svrdlo je odrezano na četiri dijela (Slika 4.2) kako bi bilo moguće vršiti ispitivanja i svaki je označen s brojem od 1 do 4. Na dijelu 1 se vršilo ispitivanje energijskom disperzivnom spektroskopijom (SEM-EDS). Dio 4 je bio namijenjen za vršenje analize optičkom emisijskom spektrometrijom.



Slika 4.2. Dijelovi svrdla koji su korišteni za ispitivanje

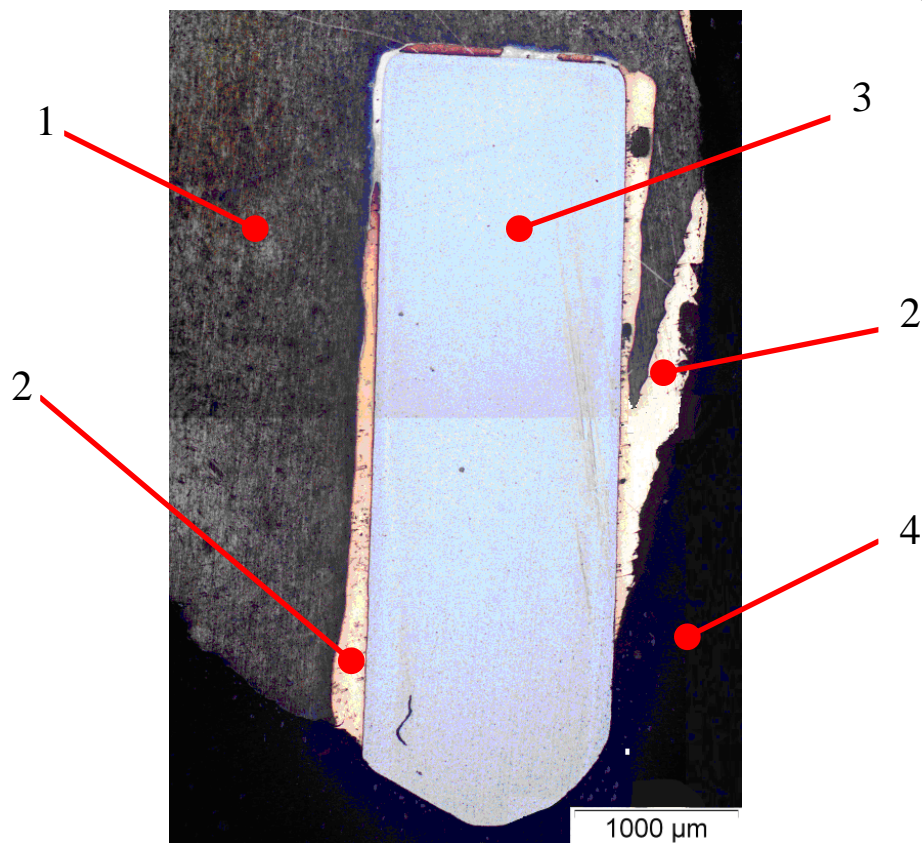
Dijelovi 1 i 3 zaliveni su u plastičnu masu, izbrušeni i polirani. Dio 3 ima izbrušenu i poliranu donju površinu, a dio 1 ravninu okomitu na strelicu (Slika 4.3).



Slika 4.3. Ravnina brušenja i poliranja dijela 1 okomita na strelicu



Slika 4.4. Brušena i polirana površina dijela 1 zalivenog u plastičnoj masi



Slika 4.5. Polirana površina dijela 1

Na slici Slika 4.5 prikazan je vrh svrdla snimljen na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 pri povećanju od 50 puta. Dijelovi označeni brojevima na slici su:

- 1 – osnovni materijal svrdla,
- 2 – lem koji drži reznju pločicu u osnovnom materijalu,
- 3 – umetnuta reznja pločica,
- 4 – masa u kojoj je umetnuti uzorak.



Slika 4.6. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51

Na slici Slika 4.7 je prikazan uređaj za brušenje i poliranje na kojem su uzorci izbrušeni, a na slici Slika 4.8 uređaj na kojem su uzorci polirani.



Slika 4.7. Uređaj za brušenje uzoraka BUEHLER - PHOENIX ALPHA



Slika 4.8. Uređaj za poliranje uzoraka Struers DAP-V

Kod lemljenja spiralnih svrdala s pločicama od tvrdog metala koristi se elektrootporno lemljenje. Toplinu potrebnu za taljenje lema stvara trenutni prolazak vrlo jake električne struje I [A] kroz materijal. Za taj efekt potrebna su tri faktora:

- a) specijalni transformator koji može generirati struju velike jakosti,
- b) zatvoren strujni krug kroz obradak,
- c) materijal koji pruža električni otpor.

Stroj za elektrootporno zavarivanje mora biti opremljen kliještima koja stisnu predmet s umetnutim lemom, uređajem za određivanje snage lemljenja i uređajem za određivanje vremena lemljenja. Postupak je brz, zagrijava se samo mjesto lemljenja, kliješta se brzo hlade i mogu se odmah premještati, lako se preuređuju u lemilice za posebne primjene, pogodno za lemljenje u uskim, malim prostorima, štede energiju,...

4.1.1. *Kemijska analiza uzorka osnovnog materijala svrdla*

Za kvantitativnu analizu uzorka optičkom emisijskom spektrometrijom potrebna je površina minimalnog promjera 16 mm. U tu svrhu dio 4 tlačen je na preši kako bi se dobila dovoljno velika površina. Budući da je uzorak male žilavosti, tijekom tlačenja došlo je do stvaranja pukotina na dijelu koje bi onemogućile određivanje kemijskog sastava ovom metodom te se pristupilo kvalitativnoj analizi.



Slika 4.9. Pukotine na dijelu 4 nastale tijekom procesa tlačanja

Kvalitativna kemijska analiza dijela 3 napravljena je na skenirajućem elektronskom mikroskopu s energijskom disperzivnom spektroskopijom (SEM-EDS).



Slika 4.10. Skenirajući elektronski mikroskop s energijskom disperzivnom spektroskopijom (SEM/EDS)

Osnove rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa sastoje se od skeniranja površine ispitivanog uzorka vrlo precizno fokusiranim snopom elektrona. Snop elektrona pobuđuje (izbija) elektrone u sastavu atoma uzorka. Energija elektrona iz snopa u izravnoj je proporciji s interaktivno pobuđenim elektronima iz uzorka.

Energije proizašlih elektrona iz uzorka skupljaju se i mjere specijalnim detektorima i uz pomoć mikroprocesora stvara se pseudotrodimenzijska slika jedinstvenih valnih duljina elektrona elemenata koji se nalaze u uzorku [42].

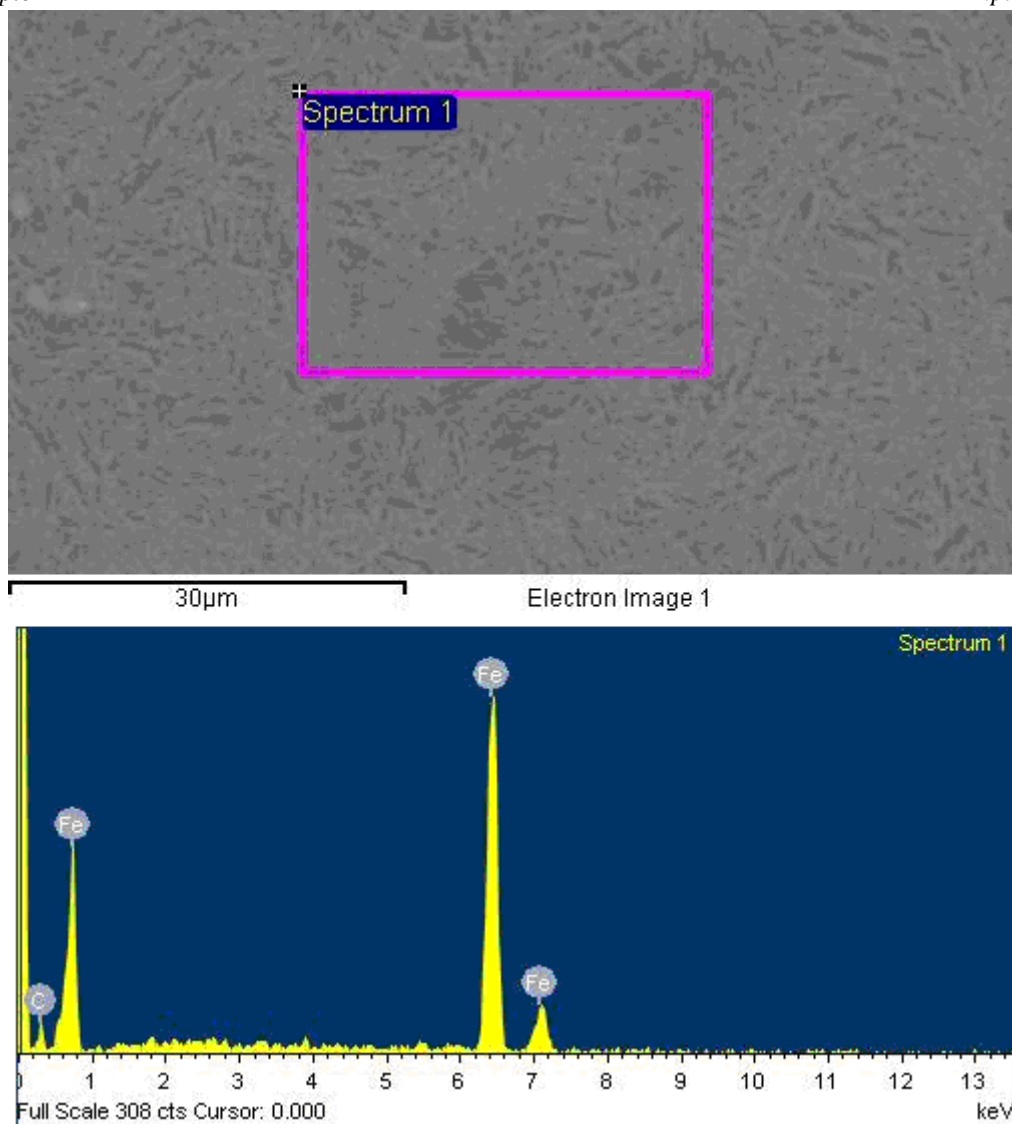
SEM ima izrazitu prednost pred ostalim mikroskopima u području nekoliko osnovnih mjerenja i metoda. Jedna od najuvjerljivijih definitivno je rezolucija – sposobnost da se "vide" veoma mali objekti. Zatim dubina polja – sposobnost da objekti različite "visine" na

uzorkovnoj površini ostanu u fokusu te mikroanaliza – sposobnost da se analizira sastav uzorka.

Uzorak se analizira tako da X-zrake nastaju kad ubrzani elektron, uglavnom iz snopa elektrona, "izbije" elektron iz unutarnje ljuske istog atoma. Elektron iz vanjske ljuske, s višom energijom tada popunjava upražnjeno mjesto i otpušta "višak" energije u obliku fotona X-zrake. Zbog toga što se energija elektrona razlikuje od ljuske do ljuske unutar atoma i specifična je za svaki određeni element, energija emitiranog fotona X-zrake karakteristična je za pobuđeni atom.

Spektrometar X-zraka prikuplja te karakteristične X-zrake, broji ih i sortira, najčešće na temelju energije (Energy Dispersive Spectrometry – EDS). Dobiveni spektar iscertava broj X-zraka na okomitoj osi nasuprot energiji na vodoravnoj osi. Vrhovi na spektru odgovaraju elementima prisutnima u uzorcima. Visina vrha energije na spektru označava koji je element u pitanju. Broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka [42].

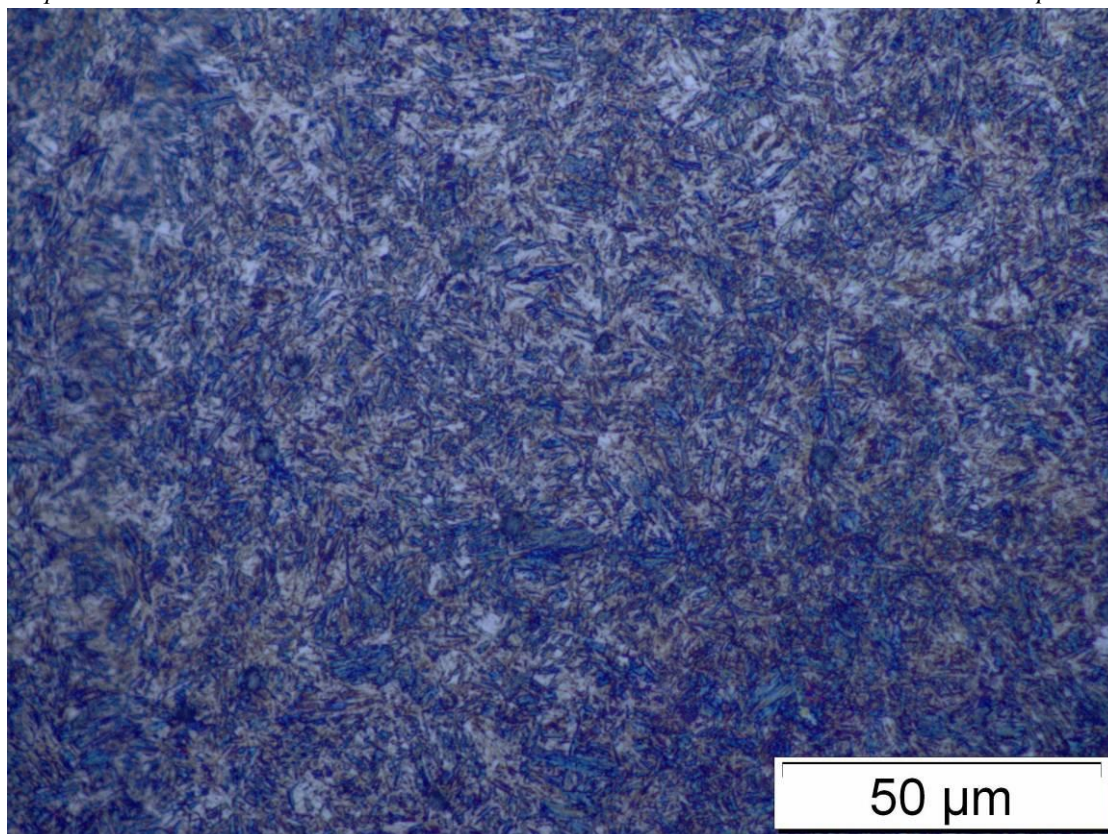
Slika 4.11 pokazuje da je svrdlo načinjeno od ugljičnog čelika jer na mjestu ispitivanja nema legirnih elemenata.



Slika 4.11. Rezultati SEM-EDS analize materijala svrdla

Slike mikrostrukutra i otisaka mjerenja tvrdoće su snimljene svjetlosnim mikroskopom.

Na slici Slika 4.12 je prikazana struktura osnovnog materijala svrdla. Korišteno je povećanje od 1000 puta i vidljiva martenzitna struktura uzorka.



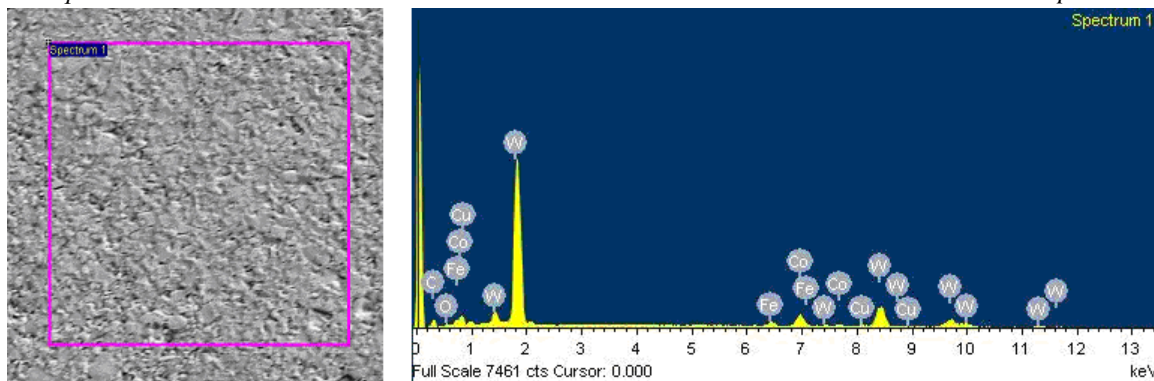
Slika 4.12. Nagrižena površina osnovnog metala svrdla (svjetlosni mikroskop)

4.1.2. *Kemijska analiza pločice svrdla*

Kvalitativna kemijska analiza pločice od tvrdog metala provedena je na dijelu 1 (svijetli dio na slici Slika 4.4)

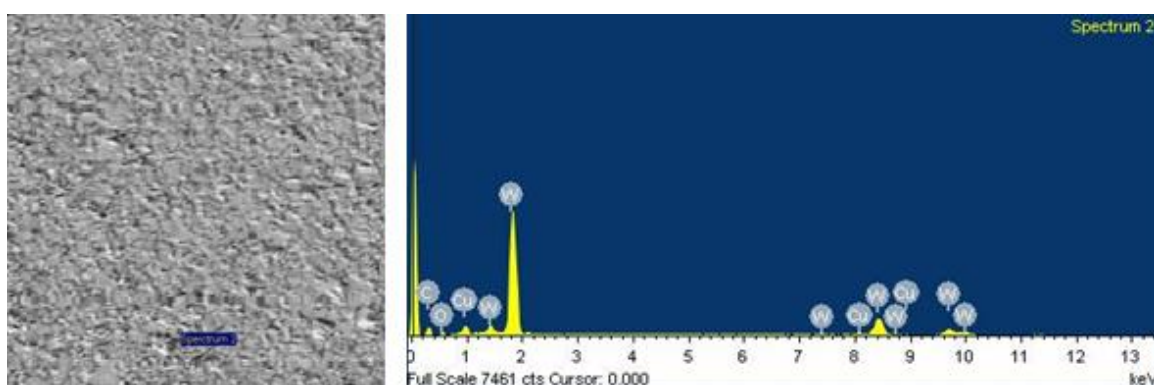
Na slici Slika 4.13 su prikazani rezultati SEM-EDS analize mikrostrukture umetnute pločice na površini približno $500 \times 500 \mu\text{m}$. Rezultati pokazuju da je u tvrdom metalu prisutan kobalt koji čini metalnu osnovu te volfram koji s ugljikom tvori karbide. Također pokazuje da nisu prisutni tragovi titana i tantala ili nekih drugih karbidotvoraca koji bi s ugljikom činili karbide.

Na istom uređaju provedena je i kvalitativna analiza koja nam je pokazala da približni maseni udio kobalta čini 8,68 %.



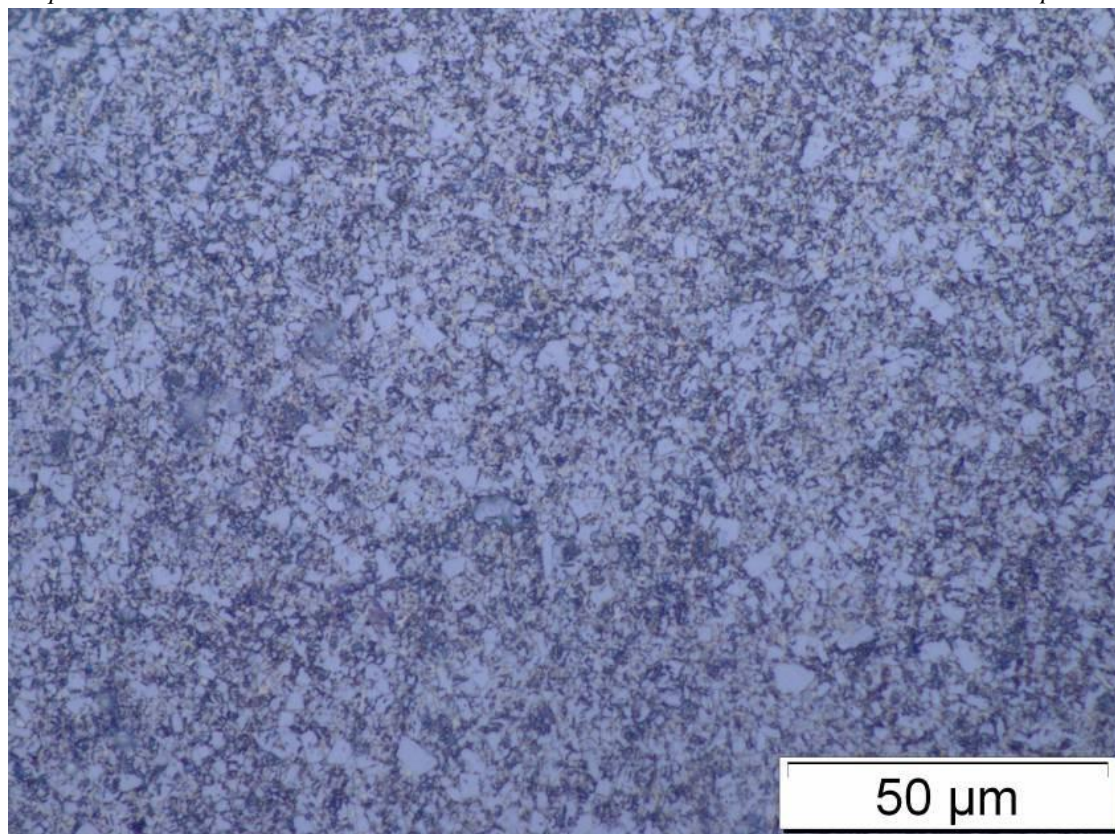
Slika 4.13. Rezultati SEM-EDS analize materijala pločice (veća površina)

Kvalitativna analiza jednog zrna strukture prikazana je na slici Slika 4.14

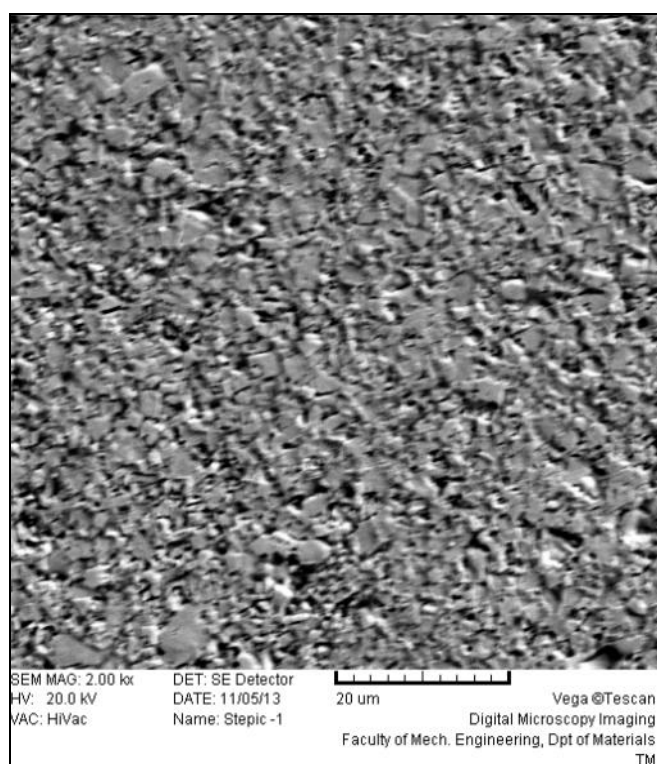


Slika 4.14. Rezultati SEM-EDS analize materijala pločice (zrno karbida)

Na slici Slika 4.15 je prikazana mikrostrukutra pločice koja je dobivena nagrizanjem sa sredstvom Murakami (100 ml destilirane vode, 10 g $K_3 [Fe(CN)_6]$, 10 g KOH ili NaOH). Korišteno je povećanje od 1000 puta i vidljiva su svijetla zrna karbida u metalnoj matrici. Karbidi su različite veličine i oblika. Na slici Slika 4.16 je prikazana mikrostrukutra dobivena elektronskim mikroskopom (SEM).



Slika 4.15. Nagrižena površina pločice od tvrdog metala (svjetlosni mikroskop)



Slika 4.16. Mikrostruktura pločice od tvrdog metala (SEM)

Na slikama mikrostrukture tvrdog metala vidljiva su zrna volfram karbida u kobaltnoj matrici. Veličina zrna karbida je poprilično neujednačena što negativno utječe na svojstva.

4.1.3. Mjerenje tvrdoće svrdla

Mjerenje tvrdoće dijelova svrdla je vršeno Vickersovom metodom (HV) tvrdomjerom prikazanim na slici Slika 4.17. Korišteno je opterećenje od 200 g (HV 0,2). Tvrdoća se mjerila na osnovnom materijalu svrdla, lemu između umetnute pločice i osnovnog materijala te na samoj umetnutoj pločici. Na svakom materijalu je vršeno mjerenje koje se sastojalo od pet ponavljanja i izračunata je srednja vrijednost. Vickers metoda se računa prema jednadžbi:

$$HV = \frac{0,189 F}{d_{HV}^2} \quad (4.1)$$

gdje je:

F – pritiska sila (težina) koja se koristi [N] i

d_{HV} – srednja vrijednost udaljenosti suprotnih vrhova [mm], a računa se kao:

$$d_{HV} = \frac{d_1 + d_2}{2} [\text{mm}] \quad (4.2)$$

gdje su:

d_1 – udaljenosti između jednih suprotnih dijagonala i

d_2 – udaljenosti između drugih suprotnih dijagonala.



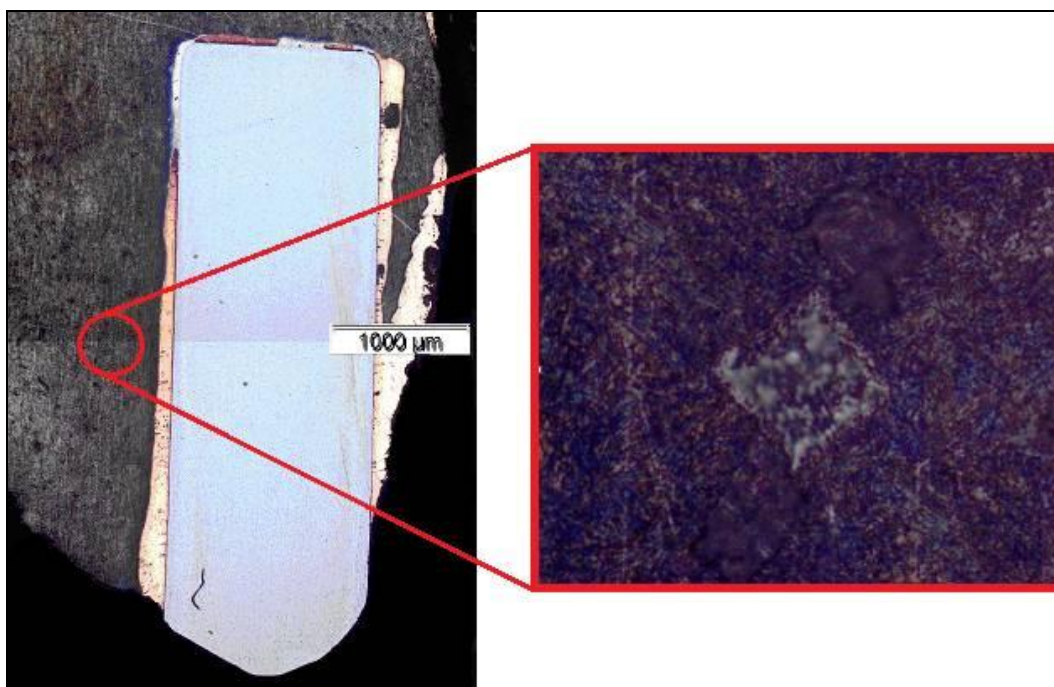
Slika 4.17. Tvrdomjer za mjerenje tvrdoće po Vickersu

U tablici Tablica 4.1 su prikazani rezultati mjerenja na osnovnom materijalu, a na slici Slika 4.18 je prikazan jedan otisak mjerenja tvrdoće.

Tablica 4.1. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala svrdla

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	470	458
2	590	
3	491	
4	391	
5	349	

Prema rezultatima mjerenja tvrdoće i pretpostavljenoj namjeni, struktura svrdla uz pločicu od tvrdog metala je popušteni martenzit.

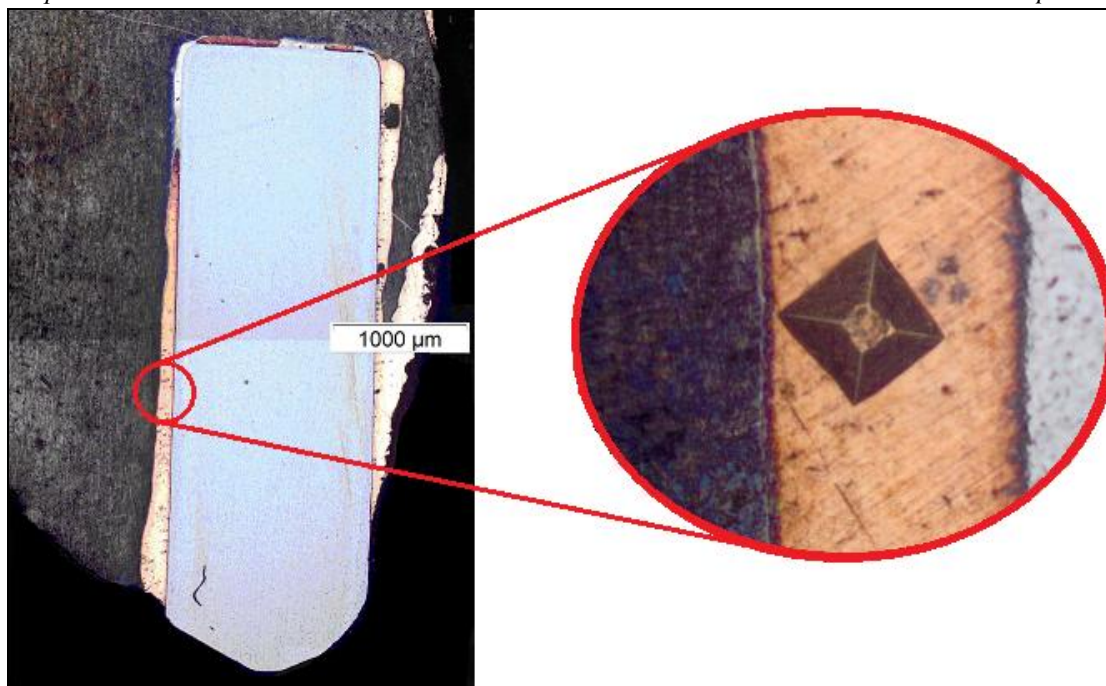


Slika 4.18. Otisak mjerenja tvrdoće na osnovnom materijalu

U tablici Tablica 4.2 su prikazani rezultati mjerenja na materijalu lema, a na slici Slika 4.19 je prikazan jedan otisak mjerenja tvrdoće.

Tablica 4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće na materijalu lema

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	82	99
2	110	
3	115	
4	84	
5	103	



Slika 4.19. Otisak mjerenja tvrdoće na lemu

Budući da se zbog male veličine otiska nije mogla precizno očitati tvrdoća tvrdog metala, njegova tvrdoća ispitana je na tvrdomjeru ZWICK, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korišteno je opterećenje od 10 N (HV 1). Dobiveni rezultati su prikazani u tablici Tablica 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati mjerenja tvrdoće tvrdog metala

Broj mjerenja	HV 1	Srednja vrijednost
1	1333	1359
2	1369	
3	1369	
4	1392	
5	1333	

Prema rezultatima kemijske analize, analize mikrostrukture i mjerenja tvrdoće može se zaključiti da se radi o tvrdom metalu grupe K. Prema [44] i provedenoj analizi, ispitivani tvrdi metal najbliži je onom oznake K-30.

4.2. Određivanje tragova trošenja

U ovom dijelu eksperimentalnog dijela će se prikazati tragovi trošenja na svim karakterističnim površinama alata. Različiti dijelovi alata su izloženi različitim uvjetima rada kao što su npr. temperatura, sile, trenje, udarci, brzine, kutevi itd. pa su stoga i različiti glavni oblici trošenja. Slike tragova trošenja svrdla su također snimljene mikroskopom Olympus GX 51 (Slika 4.6).

4.2.1. Određivanje tragova trošenja na poprečnoj oštrici i vrhu svrdla



Slika 4.20. Područje svrdla na kojem se analiziralo stanje površine vrha alata i poprečne oštrice te stražnje površine



Slika 4.21. Stanje vrha svrdla i poprečne oštrice te stražnje površine

Na slici Slika 4.20 je prikazan vrh svrdla i stražnja površina gdje se koristilo povećanje od 50 puta pod mikroskopom koje je prikazano na slici Slika 4.21. Vidljivo je kako su tragovi trošenja na poprečnoj oštrici identični tragovima na vrhu alata.

Na slici Slika 4.21 su označena područja na kojima se vide različiti mehanizmi trošenja. Područja označena slovima *a* i *b* se nalaze na vrhu alata, a područja označena slovima *c* i *d* na stražnjoj površini alata kako je vidljivo na slici Slika 4.20.

Na području označeno slovom *a* su vidljivi tragovi trošenja u obliku brazdi koje su usmjerene u vertikalnom smjeru. To je također i pravac glavne brzine rezanja za taj dio svrdla pa je i smjer tragova u tom smjeru i očekivan. Tragovi trošenja pod *a* bi se mogli usporediti sa slikom Slika 3.6, jedino što su povećanja različita pa sličnost ne bi bila dovoljno uočljiva.

Na području označenom slovom *b* uočljiv je nedostatak materijala. Ovaj oblik trošenja je nastao kao posljedica umora površine zbog nepodmazivanja tijekom obrade.

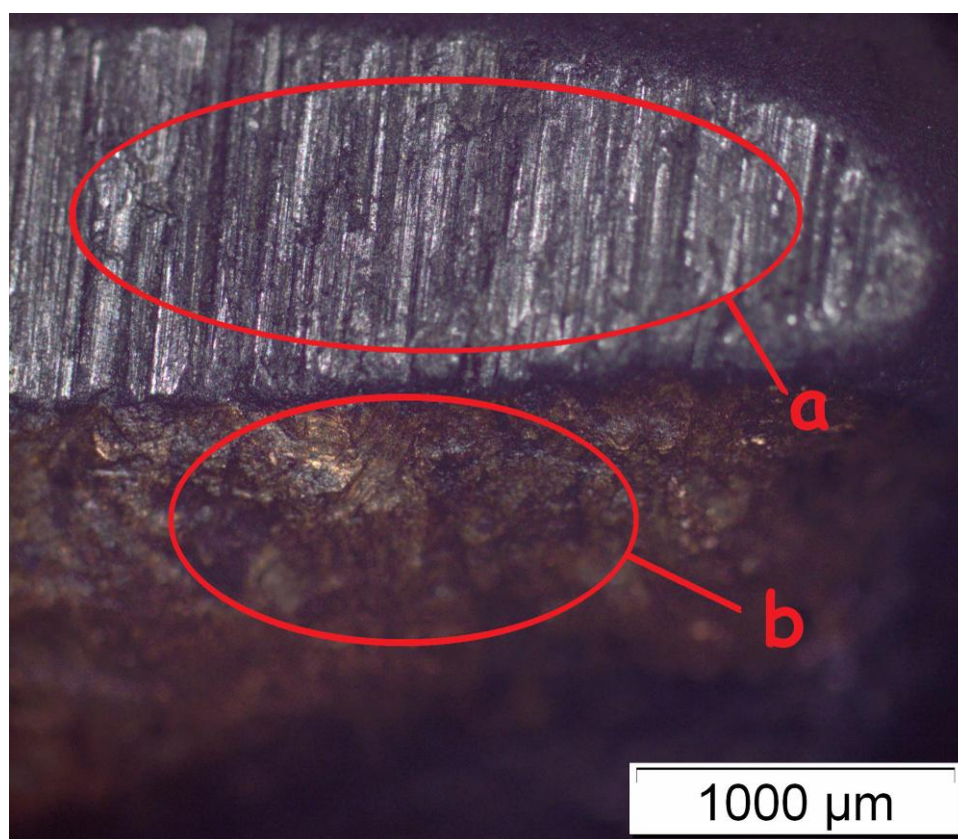
Na području označenom slovom *c* su vidljivi tragovi najbližnji tragovima kliznog procesa trošenja. Kod kliznog procesa trošenja adhezija predstavlja najutjecajniji mehanizam trošenja. Budući da kod bušenja betona ne postoji afinitet između materijala obratka i materijala alata, u ovom slučaju adhezija ne predstavlja najveću opasnost od trošenja, već je to umor površine kao drugi najveći mehanizam trošenja kod tog procesa. Tragovi trošenja na tom području i jesu nedefiniranog oblika, odnosno nisu usmjereni kao što bi bili npr. kod abrazije, već izgledaju kao hrapava površina nedefinirane geometrije.

Područje označeno slovom *d* prikazuje tragove trošenja erozijom većih i tvrdih čestica u betonu koji su doveli do tako velikih brazdi na površini alata. Taj dio svrdla je izrađen iz alatnog čelika, bez dodatnih legirajućih elemenata koji bi znatno povišili tvrdoću pa je moguće djelovanje čiste abrazije tvrdih čestica iz betona.

4.2.2. Određivanje tragova trošenja na bočnom dijelu svrdla



Slika 4.22. Tragovi trošenja na bočnom dijelu svrdla



Slika 4.23. Stanje vrha svrdla i poprečne oštrice te stražnje površine

Na slici Slika 4.23 je prikazano područje gdje se koristilo povećanje od 50 puta pod mikroskopom koje je prikazano na slici Slika 4.22.

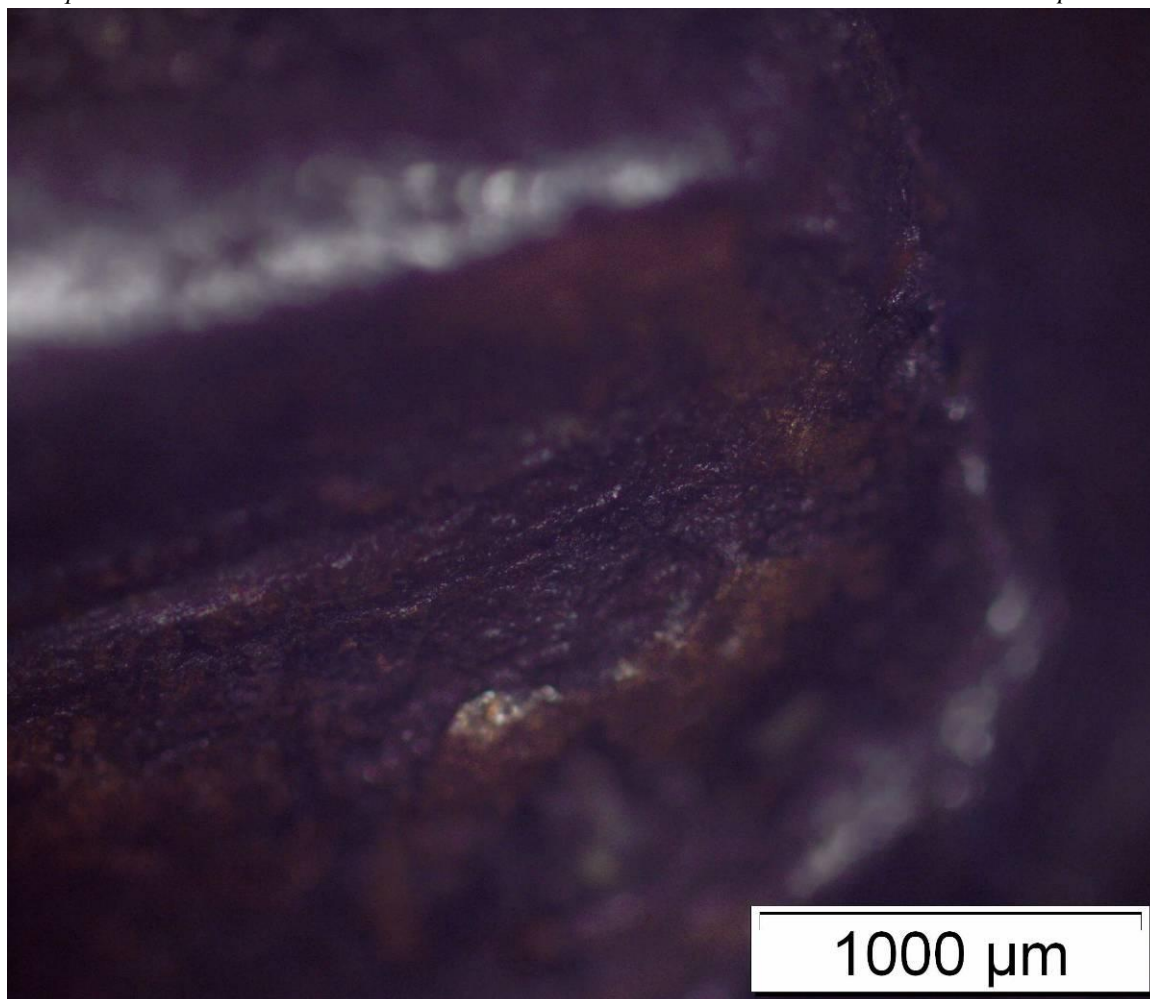
Područje označeno slovom *a* na slici Slika 4.23 je obodni dio poprečne oštrice i na njemu su kao i na slici Slika 4.21 vidljivi tragovi trošenja uzrokovani abrazijom.

Područje označeno slovom *b* na slici Slika 4.23 ima tragove oksidacijskog (korozijskog) trošenja. Ovaj oblik trošenja nije nastao tijekom rada uslijed utjecaja visokih temperatura i prisutstva vlage već zbog skladištenja na atmosferskim uvjetima. Korozija je bolje primjetna na slici Slika 4.22.

4.2.3. Određivanje tragova trošenja na dijelu utora kod glavne oštrice svrdla



Slika 4.24. Područje svrdla na kojem su se analizirali tragovi trošenja utora svrdla kod glavne oštrice



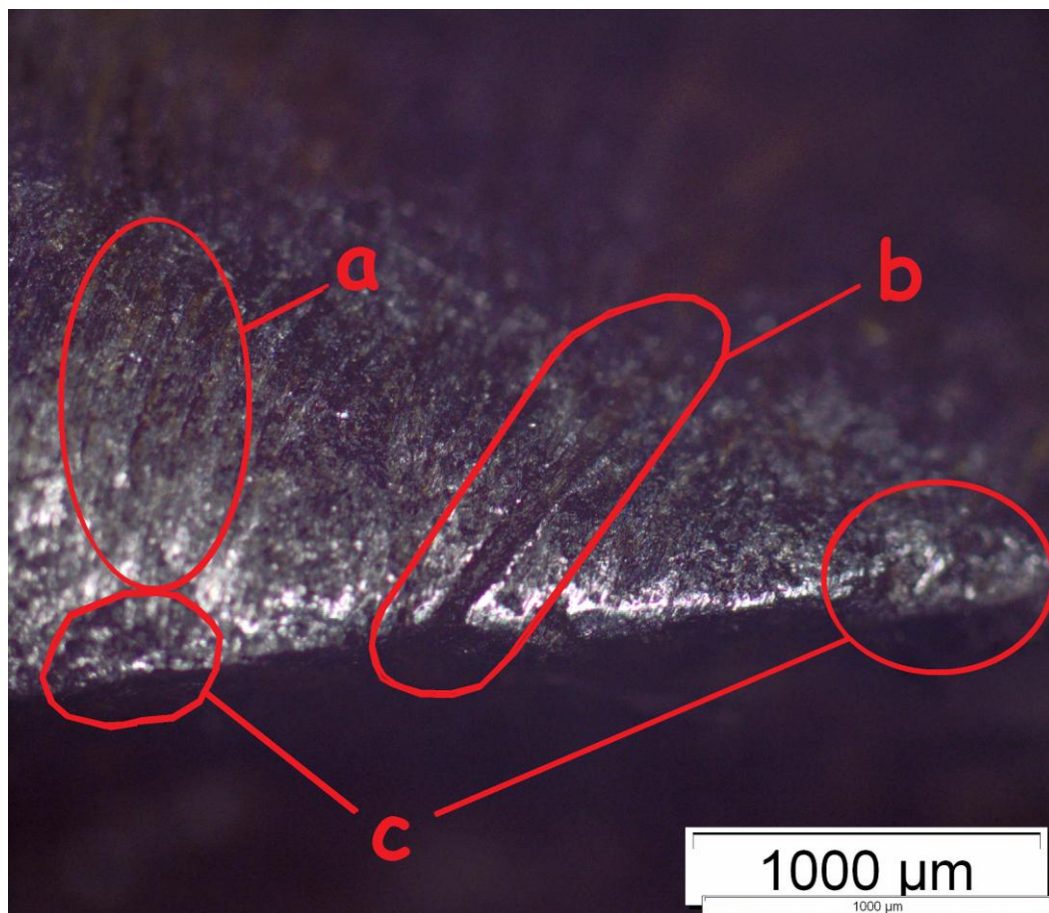
Slika 4.25. Stanje utora svrdla

Na slici Slika 4.25 se vidi područje gdje se koristilo povećanje od 50 puta pod mikroskopom koje je prikazano na slici Slika 4.24. Usmjereni tragovi trošenja uzrokovani su procesom erozije sitnih čestica betona koje su imale abrazivno djelovanje na utor svrdla tijekom njihovog odvođenja. Hrapavost površine kao i na slici Slika 4.21 nastala je zbog klizanja strugotine bez SHIP-a što je dovelo do umora površine. Također su vidljivi i tragovi oksidacijskog trošenja.

4.2.4. Određivanje tragova trošenja na rubu utora



Slika 4.26. Područje svrdla na kojem su se analizirali tragovi trošenja ruba utora



Slika 4.27. Tragovi trošenja ruba utora svrdla

Na slici Slika 4.27 je prikazano područje gdje se koristilo povećanje od 50 puta pod mikroskopom koje je prikazano na slici Slika 4.26 s vanjske strane svrdla.

Na području označenom slovom *a* se vide usmjereni tragovi trošenja uzrokovani su procesom erozije sitnih čestica betona koje su imale abrazivno djelovanje na obod svrdla. Također je i malo vidljiva prisutnost oksidacije vanjske površine svrdla.

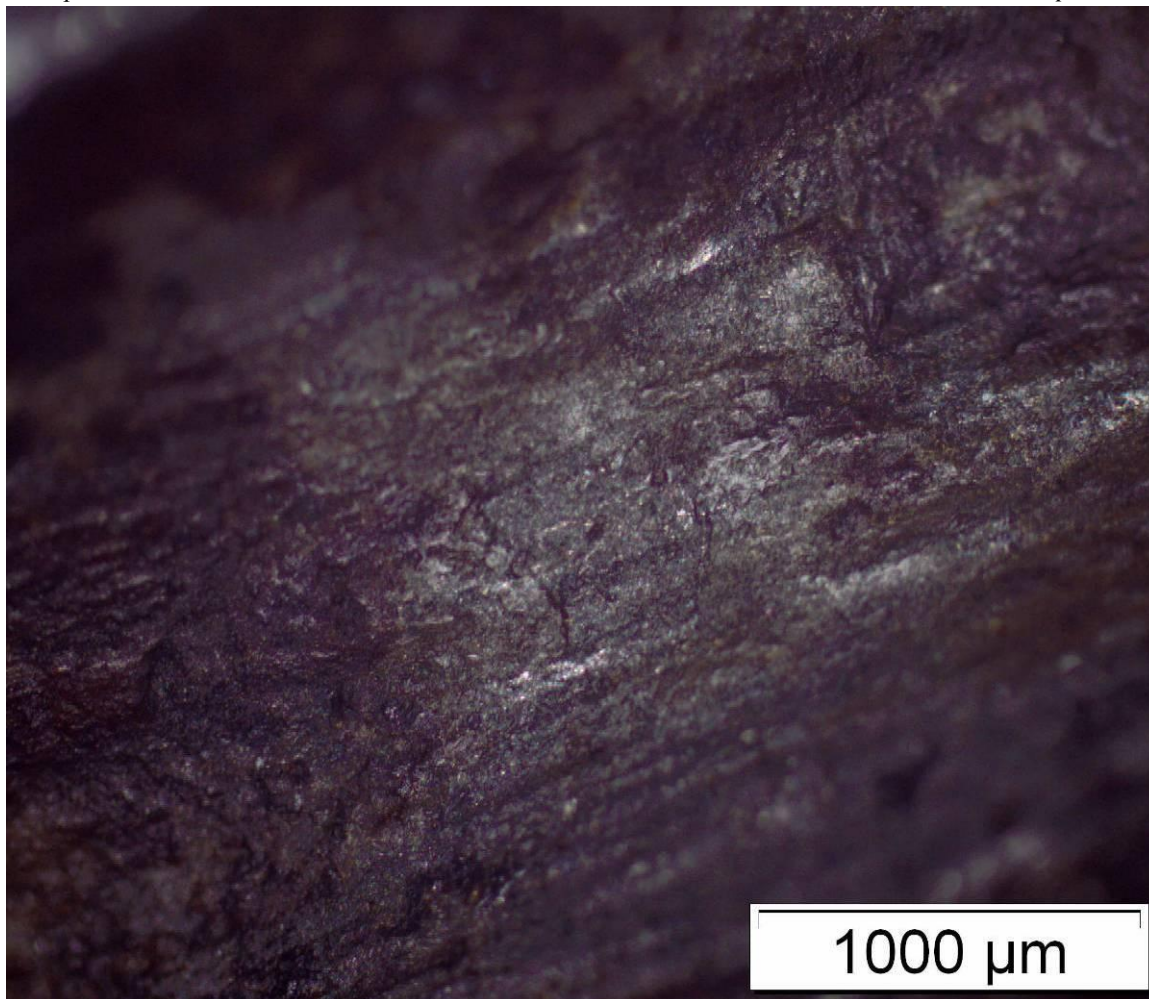
Na području označenom slovom *b* vidi se trag trošenja koji je nastao djelovanjem erozijskog procesa trošenja većih i tvrdih čestica iz betona.

Na području označenom slovom *c* vidi se površina kao i na slici Slika 4.21 nastala je zbog klizanja strugotine bez SHIP-a što je dovelo do umora površine.

4.2.5. Određivanje tragova trošenja na utoru svrdla



Slika 4.28. Područje svrdla na kojem su se analizirali tragovi trošenja utora svrdla



Slika 4.29. Tragovi trošenja ruba utora svrdla

Na slici Slika 4.29 je prikazano područje gdje se koristilo povećanje od 50 puta pod mikroskopom koje je prikazano na slici Slika 4.28 s vanjske strane svrdla. Usmjereni tragovi trošenja uzrokovani su procesom erozije sitnih čestica betona koje su imale abrazivno djelovanje na utor svrdla. Ti tragovi su usmjereni u smjeru utora, odnosno imaju isti smjer kojim se kreće odvojena čestica. Tragovi trošenja koji su nepravilnog oblika, odnosno tragovi koji nisu usmjereni kao oni uzrokovani abrazijom, nastali su zbog klizanja svrdla po utoru bez SHIP-a što je dovelo do umora površine.

5. ZAKLJUČAK

Složena geometrija svrdla i nepogodnosti same operacije uvelike otežavaju operaciju bušenja. Poboljšanje se može postići pravilnim odabirom alata, što obuhvaća njegovu geometriju (npr. manji kut poprečne oštrice i kut uspona) i materijal od kojeg je izrađen ili prevlaku kojom je prevučen. Pritom treba biti pažljiv kako se ne bi odabrao premali kut poprečne oštrice koji bi mogao oslabjeti alat, ali i da se ne odabere materijal koji je preskup, a njegova se otpornost ne može iskoristiti. Osim samog materijala, važna je i njegova toplinska obrada, odnosno struktura. To se dobro vidi na dijelu svrdla sa neujednačenom veličinom zrna karbida.

Potrebno je odabrati odgovarajuće režime obrade kako bi se optimalno smanjili svi oblici trošenja, ali i maksimalno iskoristilo svrdlo. Zbog geometrijske složenosti svrdla i samog procesa bušenja različiti dijelovi svrdla su izloženi različitim uvjetima obrade i procesima trošenja. Trošenje nekih dijelova svrdla kao što je utor za odvođenje odvojene čestice nije od velike važnosti, dok je trošenje glavne i poprečne oštrice vrlo važno za daljnje korištenje svrdla. Svrdlo je korišteno za bušenje betona gdje se naišlo na čestice čija je tvrdoća bila veća od tvrdoće materijala svrdla te su nastali tragovi trošenja u obliku povećih brazdi. Kako je svrdlo izrađeno od ugljičnog čelika, njegova je otpornost na popuštanje mala. Budući da tijekom korištenja svrdlo nije bilo hladeno, to je dodatno dovelo do njegove sklonosti abrazijskom trošenju što je dobro vidljivo na glavnoj i poprečnoj oštrici te rubovima utora.

LITERATURA

- [1] S. Škorić: Autorizirana predavanja iz kolegija *Obrada odvajanjem čestica*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, šk. god. 2008/2009.
- [2] http://i01.i.aliimg.com/photo/v0/103782429/pillar_drill_machine.jpg
- [3] <http://www.radialdrillingmachine.net/wp-content/uploads/2009/12/Radial-Drilling-Machine-Z3050x16-.jpg>
- [4] <http://3.imimg.com/data3/IP/JB/MY-3234872/hand-drill-machines-500x500.jpg>
- [5] http://www.ashden.org/images/hi_res/eac06b.jpg
- [6] Šime Šavar: *Obrada odvajanjem čestica II. dio*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1987.
- [7] http://www.tatinstrument.ru/i/catalog/WT_Drills_GB_72dpi.pdf
- [8] <http://americanmachinist.com/cutting-tools/cutting-tool-applications-chapter-9-drilling-methods-and-machines>
- [9] http://image.shutterstock.com/display_pic_with_logo/62589/109985030/stock-photo-air-conditioning-master-preparing-to-install-new-air-conditioner-drilling-the-wall-109985030.jpg
- [10] Bruno Rebec: *Rezni alati sa dodatkom određene geometrije oštrice*, Sveučilište u zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1990.
- [11] http://www.phillygreenhome.com/images/test_drilling_npc8.jpg
- [12] http://www.uredidom.com/Portals/0/CLANCI_FOTO/gradnja/bosch/GBH_3-28_DFR_02.jpg
- [13] <http://www.ihconstruction.com/wp-content/uploads/2011/08/wet-concrete-saw.jpg>
- [14] <http://cuttingtoolschicago.com/metalcuttingtools/wp-content/uploads/2012/09/t-feed.jpg>
- [15] <http://www.intechopen.com/source/html/41281/media/image28.png>
- [16] Mladen Novosel, Franjo Cajner, Dragutin Krumes: *Alatni materijali*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Zagreb, 1996.
- [17] F. Cajner: Autorizirana predavanja iz kolegija *Alatni materijali*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, šk. god. 2009/2010.
- [18] T. Udiljak: Autorizirana predavanja iz kolegija *Postupci obradbe odvajanjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, šk. god. 2011/2012.POO
- [19] Ekinović, S.: *Obrada rezanjem*, Dom štampe, Zenica, 2001.

- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide
- [21] <http://accuratus.com/alumox.html>
- [22] http://www.ortechceramics.com/silicon_nitride.htm
- [23] http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pecvd_sin.htm
- [24] <http://www.jindainc.com/Images/ceramic%20inserts.jpg>
- [25] http://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrđi_metal#Volframov_karbid
- [26] F. Cajner: Autorizirana predavanja iz kolegija *Postupci modificiranja i prevlačenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, šk. god. 2011/2012.
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum_carbide
- [28] http://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrđi_metal
- [29] <http://www.njuskalo.hr/image-bigger/strojevi-obrada-metala/svrdla-slika-11914725.jpg>
- [30] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cermet>
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Boron_nitride
- [32] http://www.kyocera.eu/index/products/cutting_tools/advanced_materials/cubic_boron_nitride.html
- [33] <http://www.indiamart.com/kamalaengineering/pcd-cbn-cutting-tools.html>
- [34] http://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Hartspan-Projekt/NEWS/CBN_Coating.pdf
- [35] K. Grilec: Autorizirana predavanja iz kolegija *Tribologija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, šk. god. 2012/2013.
- [36] <http://www.mastertechdiamond.com/pcd-cutting-tools.html>
- [37] Šime Šavar: Obrada odvajanjem čestica I. dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1977.
- [38] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Oksidacija>
- [39] http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=oksidacija+metala&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.pfst.hr%2F~ivujovic%2Fstare_st_ranice%2Fppt%2Fpred14.ppt&ei=7INJUubGOdb4QTP04CgDA&usg=AFQjCNGS0iuxbYOGPSLWpG_CyPMzx_BSZQ&sig2=sOLy9jOkjEdasUzNN_ffxQ&bvm=bv.53217764,d.bGE
- [40] Đ. Španiček, M. Franz: Autorizirana predavanja iz kolegija *Materijali I*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, šk. god. 2007/2008.
- [41] <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/4%20NNDifuzija.pdf>
- [42] <http://www.fsb.unizg.hr/library/fileopen.php?id=2371>
- [43] <http://www.olympus-ims.com/en/microscope/gx51>
- [44] <http://www.alfatim.hr/proizvodni-program/tvrđi-metal/d6/>

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija